



AURINKOPANEELIJÄRJESTELMÄN RUNKORAKENTEIDEN SUUNNITTELU

Valtteri Hieta-Koivisto

Opinnäytetyö
Marraskuu 2014
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

HIETA-KOIVISTO, VALTTERI:

Aurinkopaneelijärjestelmän runkorakenteiden suunnittelu

Opinnäytetyö 115 sivua, joista liitteitä 28 sivua
Marraskuu 2014

Tämä opinnäytetyö on tehty osana älykkään kaupungin tutkimusympäristöhanketta. Projektin tavoitteena oli tutkia ja vahvistaa tietämystä älykkäistä sähköverkoista Tampereella. Opinnäytetyössä pyrittiin kehittämään Tampereen aikuiskoulutuskeskukselle aurinkopaneelijärjestelmän runkosuunnitelma, jota käytettäisiin runkoa valmistettaessa. Pääasiallinen tavoite oli tuottaa työpiirustukset järjestelmästä, missä on 12 m² aurinkopaneeleita 6 metrin korkeudella ja joita tulisi pystyä kääntämään pystysuunnassa ja vaakasuunnassa maasta käsin.

Suunnittelutyö saatiin rakenteiden osalta valmiiksi, mutta työpiirustuksia ei laadittu kaikista rakenteista työn tilaajan päätettyä jättää runko rakentamatta. Teknisesti suunnitelma oli toimiva ja se pääsi riittävän lähelle tavoiteltuja ominaisuuksia, sekä se oli kustannuslaskelmien mukaan budjetissa. Suunniteltuun rakenteeseen pystyy kiinnittämään 8 kpl maksimissaan 1000x1800 mm aurinkopaneelit 6 m korkeuteen. Teoriassa sitä pystyy maasta käsin kääntämään 6° välein haluttuun ilmansuuntaan ja kääntämään paneelit haluttuun kulmaan 10-100 kääntöalueella 4° lukitusvälillä.

Suunnitelman laajuus huomioiden ei voida olettaa kaikkien pientenkin yksityiskohtien menevän kerralla oikein. Valmistuksen yhteydessä kuitenkin oli tarkoitus viilata viimeisetkin yksityiskohdat ja valmistustekniset seikat kuntoon. Työn tilaajan kuitenkin ilmoittaessa olla valmistamatta suunniteltua paneelijärjestelmää valmistusvaihe jäi toteutumatta. Projekti oli joka tapauksessa onnistunut ja laajuudeltaan hyvin koneensuunnitteluun soveltuva.

Asiasanat: teräsrakenne, perustukset, aurinkopaneeli, mekanismi

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Mechanical and Production Engineering
Product Development

VALTTERI HIETA-KOIVISTO:
Solar panel systems structure design

Bachelor's thesis 115 pages, appendices 28 pages
November 2014

This thesis has been done as part of the smart city project. The project's goal was to improve knowledge about smart grid. This thesis main goal was develope plannings of the body structure for solar panel system. Solar panel system had to be 6 meters high and be able to carry eight 250W solar panels. Additionally solar panels should be able to rotate in different cardinal points and angle of panels should be adjustable.

The plannings of the structure were completed but all technical drawings were not drawn because of decision of this thesis orderer. Technically taken, plannings were working and structure met the requirements set for it. It is 6 meters high and it could carry eight solar paneld sized up to 1800 x 1000 milimeters. The rotating mechanism of the cardinal point can be locked up to 60 different positions and the panel angle can be locked up to 23 different positions.

The subject of the thesis was very wide, so every little details were not designed. The details should have been handled at the same time when producing this structure. However, the structure was not made. Anyway, this project had succeeded and it repeated well lots of knowledge about machine desing.

Key words: steel structure, foundation, solar panel

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	10
2	ÄLYKKÄÄN SÄHKÖVERKON TUTKIMUSHANKE	11
3	SUUNNITTELUTYÖN KUVAUS	12
4	KUORMITUKSET	14
4.1	TUULIKUORMITUS.....	14
4.1.1	Tuulikuormitus paneeleihin	14
4.1.2	Tuulikuormitus pystyrunkoon.....	16
4.2	LUMIKUORMITUS	18
4.2.1	Lumikuormitusten määrittäminen standardin EN 1991-1-3 mukaan.....	18
5	PERUSTUSTEN SUUNNITTELU	20
5.1	Pilarianturan mitoitus.....	20
5.2	Perustuksen raudoituksen mitoitus	22
6	PYSTYRUNGON SUUNNITTELU	24
6.1	Pystyrungon vahvikerivat	24
6.2	Pohjalevyn ja pohjalevyn jäykisteiden mitoitus	25
6.3	Pystyrungon lujuuslaskenta	25
6.3.1	Siirtymä.....	26
6.3.2	Jännitykset.....	26
6.3.3	Lommahdus.....	27
6.4	Pystyrungon yläpää.....	27
6.4.1	Pystyrungon yläpään lujuustarkastelu.....	27
7	YLÄTASANTEEN SUUNNITTELU.....	31
7.1	Ylätason akselin rakenne	33
7.1.1	Ylätason lujuuslaskenta.....	34
7.1.2	Ylätason akselin lujuuslaskenta	34
8	YLÄRUNGON SUUNNITTELU	35
8.1	Ylärunгон perusrakenne	35
8.1.1	Ylärunгон keskituen suunnittelu	36
8.1.2	Ylärunгон sivutuen suunnittelu	36
8.1.3	Keskiosan sivutuen suunnittelu.....	37
8.2	Ylärunгон lujuuslaskenta.....	38
8.2.1	Normaalivoimat.....	39
8.2.2	Siirtymät.....	40
8.2.3	Taivutusmomentti	41
8.2.4	Erilaisen sivutuen tarkastelu	41
8.2.5	Monella tavalla kuormitetun palkin tarkastelu.....	43

8.2.6 Ristikkoputken nurjahdustarkastelu	44
9 PÄÄAKSELI.....	45
9.1 Pääakselin suunnittelu.....	45
9.1.1 Pääakselin lujuuslaskenta.....	46
9.2 Pääakselin laakeripesän suunnittelu.....	48
9.2.1 Laakeripesän lujuuslaskenta.....	49
9.2.2 Lumikuormituksen käsinlaskenta	52
9.2.3 Laskentatulosten vertailu	53
10 AURINKOPANEELIEN KIINNITYS KEHIKKO	55
10.1 Aurinkopaneelien kiinnitys	55
10.2 Kelkan suunnittelu	56
10.3 Kelkan lujuuslaskenta	58
11 KÄÄNTÖMEKANISMIT.....	60
11.1 Ilmansuunnan käännön vaihtoehdot	60
11.1.1 Ilmansuunnan käännön suunnittelu.....	61
11.1.2 Ilmansuunnan käännön lujuuslaskenta.....	63
11.2 Ilmansuunnan käännön lukitus	64
11.2.1 Ilmansuunnan lukituksen lujuuslaskenta.....	65
11.2.2 Ilmansuunnan lukituslevyn tukipalkin käsinlasku	68
11.2.3 Ilmansuunnan lukituksen tulosten vertailu.....	69
11.3 Paneelien kulman käännön vaihtoehdot	70
11.3.1 Paneelien kulman käännön suunnittelu.....	71
11.3.2 Paneelien käännön laskut	73
11.4 Paneelien käännön lukitus	73
11.4.1 Paneelien käännön lukituksen lujuuslaskenta	75
12 TYÖPIIRUSTUKSET	79
13 RAKENTEIDEN KORROOSIOSUOJAUS	80
13.1 Korroosiosuojan valinta	80
13.1.1 Korroosionestomaalaus	81
13.1.2 Kuumasinkitys	82
14 POHDINTA.....	84
LÄHTEET	86
LIITTEET	87
Liite 1. Perustusten mitoitus	87
Liite 2. Pystyrungon lommahdustarkastelu	92
Liite 3. Pääakselin lujuuslaskut	97
Liite 4. Ylärungon kuormitetuimman palkin tarkastelu	99
Liite 5. Paneelirunkojen väliputken 2 nurjahdus	100
Liite 6: Laakeripesän käsinlasku	101

Liite 7: Kelkan välipalkin käsinlasku	102
Liite 8: Ilmansuunnan kääntömekanismin laskut	103
Liite 9: Ilmansuunnan kääntömekanismin akselinvälit	106
Liite 10: Ilmansuunnan käännön lukitustapit	107
Liite 11: Ilmansuunnan lukituslevyn tukipalkit.....	108
Liite 12: Paneelikulman akseleiden kiilaliitokset.....	109
Liite 13: Paneelien kulman lukitustappi	111
Liite 14: Paneelirunkojen välisen pääakselin työpiirustus	112
Liite 15: Keskivaihteen katteen työpiirustus	113
Liite 16: Paneelirungon keskituen hitsauskokoonten työpiirustus	114
Liite 17: Paneelirunkojen välisen pääakselin kokoonpanon työpiirustus.....	115

SYMBOLILUETTELO

A_{ref}	tuulipinta-ala, m^2
$A_{\text{ref}2}$	pystyrungon tuulipinta-ala, m^2
A_s	raudoitusteräksen pinta-ala, m^2
a	pienahitsin a-mitta, m
A_v	leikkauspinta-ala
b	pituusmitta, m
c_r	rosoisuuskerroin
c_f	tuulen voimakkeroin
c_{pe}	ympyräsylinteriin vaikuttava voimakkeroin
C_e	tuulensuojaisuuskerroin
C_t	lämpötilakerroin
c_x	anturan tason leveys, m
C_{my}	momenttipinnan muotokerroin
C_{mz}	momenttipinnan muotokerroin
d	perustuksen paksuus, m
d_a	suhteellinen korkeus, m
d	pituusmitta, m
d_r	akselin laskennallinen halkaisija, m
E	kimmokerroin, Pa
e_r	P4C epäkeskeisyysmitta, m
F_w	tuulikuorma, N
F_{w2}	tuulikuormitus pystyrungolle, N
F_{cd}	syvyyskerroin
F_{qd}	syvyyskerroin
$F_{\gamma d}$	syvyyskerroin
F_{cs}	muotokerroin
F_{qs}	muotokerroin
$F_{\gamma s}$	muotokerroin
f_{ctd}	betonin puristuslujuus, Pa
f_{cd}	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo, Pa
f_{yd}	betoniteräksen mitoitusmyötölujuus, Pa
f_{yk}	betoniteäksen myötölujuus, Pa
f_{wd}	hitsiaineen leikkauslujuus, Pa
I_v	tuulen puuskien intensiteetti
I	taivutusneliömomentti, mm^4
k_r	maastokerroin
k_i	pyörteisyyskerroin
K_f	lovenmuotoluku
k_{yy1}	kuormien yhteisvaikutustekijä
k_{yy2}	kuormien yhteisvaikutustekijä
k_{zz1}	kuormien yhteisvaikutustekijä
k_{zz2}	kuormien yhteisvaikutustekijä
l	korkeus, m

L_n	nurjahduspituus, m
M	momentti, Nm
M_t	momentinsiirtokyky, Nm
$M_{z.Ed}$	taivutusmomentti z-suunta, Nm
$M_{y.Ed}$	taivutusmomentti y-suunta, Nm
$M_{t.Ed}$	vääntömomentti, Nm
N_c	maaperän kantokykykerroin
N_q	maaperän kantokykykerroin
N_γ	maaperän kantokykykerroin
N_{ed}	normaalkuorma, N
$N_{c.Rd}$	puristuskestävyys, N
$N_{b.Rd}$	nurjahduskestävyys, N
p_d	anturan maksimikuormitus, Pa
P_n	lommahduksen rajakuormitus, N
p_{sall}	sallittu pintapaine, Pa
q_p	puuskanopeuspaine, Pa
q_u	pilarianturan kantokyky, Pa
Q_{ult}	perustuksen kantokyky, N
Q	perustukseen vaikuttava kuorma, N
q_0	kuormitus, N/m
Q	valmistusluokan mukainen laskentaparametri
r_m	putken halkaisijan keskilinjan säde, m
Re	Reynoldsin luku
s	lumikuorma, Pa
s_k	maapinnan lumikuormitus, Pa
v_m	tuulen nopeuden modifioitu perusarvo, m/s
v_b	tuulennopeuden modifioimaton perusarvo, m/s
v	tuulen nopeuden huippuarvo, m/s
v_{max}	siirtymä, m
$V_{y.Ed}$	leikkausvoima y-suunta
$V_{z.Ed}$	leikkausvoima z-suunta
V_{Ed}	leikkausvoimien suurin arvo
$V_{pl.T.Rd}$	leikkauskestävyys, N
y_0	pintakeskiön paikkamitta, m
z	tuulikuorman tarkastelukorkeus, m
z_0	rosoisuusmitta, m
z_{0II}	rosoisuusmitta maastoluokassa 2, m
α_{cc}	betonin puristuslujuuden mitoituskerroin
α_x	pienennystekijä lommahdukselle
α	epävarmuustekijä
γ_c	eurokoodin mukainen mitoituskerroin
γ_s	eurokoodin mukainen mitoituskerroin
γ_{M1}	lommahduskestävyyden osavarmuusluku
γ_{M0}	osavarmuusluku
δ_t	taivutusjännitys, Pa
δ_N	normaalijännitys, Pa

Δw_k	epätarkkuusamplitudi, m
ε	poikkileikkauksen määritystekijä lommahduksessa
λ_x	muunnettu hoikkuus
$\lambda_{pl.x}$	muunnetun hoikkuuden plastinen raja-arvo
μ	muotokerroin katolle
μ	anturan suhteellinen momentti
ρ	ilman tiheys, kg/m ³
σ_{cr}	kriittinen lommahdusjännitys, Pa
$\tau_{t.Ed}$	vapaan väännön osuus leikkausjännityksestä, Pa
φ	maaperän leikkautumiskulma, deg
χ_x	kimmoplastinen pienennystekijä
$\psi_{\lambda\alpha}$	päätevaikutuskerroin

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyön tavoite oli suunnitella toteuttamiskelpoinen ratkaisu suunnitteilla olleeseen aurinkopaneelijärjestelmään. Järjestelmää suunniteltiin rakennettavaksi Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen testikentälle, missä sillä tuotettaisiin sähköä tutkimuksen alla olevaan älykkääseen sähköverkkoon. Älykäs sähköverkko on nimitys verkolle, missä energian varastointi, tuulivoima, aurinkovoima ja pientuotanto ovat keskeissä rooleissa. Älyverkon suunnittelu on ajankohtaista, sillä vanha tuotantomalli missä suuret tuotantoyksiköt siirtävät sähkön loppukäyttäjälle on jäämässä vanhaksi ja tilalle on tulossa entistä joustavampi älykäs sähköverkko. (<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/alykas-verkko>)

Aurinkopaneelijärjestelmän suunnittelua rajasivat lopputuotteen ominaisuudet jotka olivat: n. 7000 € hinta, 6 m korkea, mahdollisuus kiinnittää 2 kW aurinkopaneeleita ja maasta käytettävät kääntömekanismit ilmansuunnalle ja paneelikulmalle. Lisäksi oli otettava valmistusteknisiä asioita huomioon, sillä runko oli tarkoitus valmistuttaa Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen metalliosaston toimesta.

Aurinkopaneelijärjestelmän suunnittelua lähdettiin toteuttamaan kahden hengen voimin. Toinen henkilö suunnitteli sähköt ja valitsi paneelit ja toinen henkilö suunnitteli kaiken runkoon liittyvän. Tämä työ käsittelee runkosuunnitelmaa. Runkosuunnitelman tavoitteena oli suunnitella kaikki runkorakennelman kannalta oleellinen ja jättää työn ulkopuolelle pieni valmistusvaiheessa tapahtuva viilailu ja pikku yksityiskohdat. Lisäksi alunperin oli tarkoitus tuottaa työpiirustukset jokaisesta osasta, mutta projektin edetessä ilmeni ettei niitä tarvita, joten ne rajattiin lopullisen opinnäytteen ulkopuolelle.

2 ÄLYKKÄÄN SÄHKÖVERKON TUTKIMUSHANKE

Tampereenseudulla on meneillään kehityshanke, mikä tähtää fiksumman kaupunkiseudun kehittämiseen vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteena on elinvoimainen ja innovatiivinen Tampereen seutu, joka soveltaa uutta tietoa terveydenhoidossa, tuotannossa ja liikkumisessa. Lisäksi näihin alueisiin liittyviä projekteja ja osaamista on tarkoitus kansainvälisesti kaupallistaa menestyväksi liiketoiminnaksi. Näissä projekteissa ovat mukana muun muassa Tampereen ammattikorkeakoulu, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampereen aikuiskoulutuskeskus, sekä yritysmaailman edustajia kuten Cargotec, Sandvik ja Metso. (<http://www.tem.fi/>)

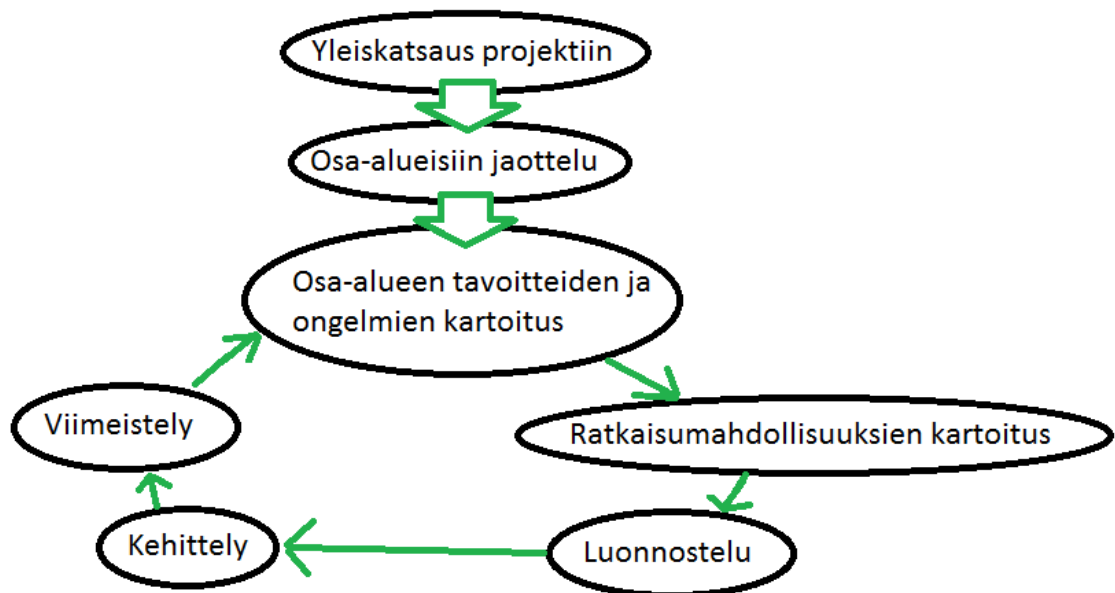
Tämä opinnäytetyö liittyy osaksi älykkään sähköverkon tutkimusta. Älykäs sähköverkko on nimitys toimintamallille, missä yhdistetään etäluettavia sähkömittareita, sähköyhtiöiden ICT-järjestelmiä, sähkön pientuotantoa ja automaatiota keskenään. Tavoitteena koko järjestelmällä on luoda joustavampaa sähköverkkoa, mikä voi reagoida salamannopeasti kulutuksen muutoksiin ja mahdollisiin verkon häiriöihin. Joustavuuden kannalta keskeiseksi tekijöiksi muodostuu mahdollisuus varastoida energiaa ja tuottaa sitä hajautetusti. Hajautettuna esimerkiksi kotitaloudet voivat tuottaa halvan sähkön aikana energiaa akkuihin ja kalliin sähkön aikana purkaa omia energiavarastojaan. Tämä tuottaa kuluttajalle taloudellista hyötyä ja on hyvä pohja taloudellisen liiketoiminnan kehittämiseksi. (www.fortum.com)

Tämän kaltainen älykkään sähköverkon rakentaminen on tarkoitus aloittaa Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen testikentällä loppuvuonna 2014. Järjestelmään on suunniteltu tulevan energiavarasto, aurinkopaneeleja, aggregaatti, kuormitusratkaisuja kuten sähköauton latauspiste, sekä täydellinen valvonta ja ohjausjärjestelmä. Tavoitteena on lisätä tuntemusta kokonaisratkaisuista, kehittää osaamista kyseisellä alalla ja lopulta kehittää kaupallisia sovellutuksia.

Tässä työssä tehty runkosuunnitelma mahdollistaa yllä mainitun järjestelmän aurinkoenergia tehokkaan tuottamisen ja samalla tarjoaa Tampereen aikuiskoulutuskeskuksen opiskelijoille tutkimusvälineen aurinkoenergian tutkimiseen.

3 SUUNNITTELUTYÖN KUVAUS

Runkorakenteen suunnittelutyö aloitettiin selvittämällä työn tilaajan kanssa projektin keskeiset tavoitteet, aikataulut ja käytettävissä olevat resurssit. Näiden pohjalta hahmoteltiin karkeita suuntaviivoja ja aikataulua työlle ja aloitettiin suunnittelutyö. Yhden miehen tuotekehitystyhmässä jätettiin suosiolla käyttämässä mitään kaavamaisia tuotekehityksen työkaluja. Nykykaikaisten tuotekehitysmenetelmien oikeanlainen käyttö mahdollisesti olisi lyhentänyt ja yhtenäistänyt suunnittelutyötä, mutta käytettävyys yhden henkilön suunnitteluyhteisössä koettiin tässä työssä heikoksi. Suunnittelutyössä käytettiin kuvan 1 mukaista peruskaavaa.



Kuva 1: Runkorakennesuunnitelman työkaavio

Koko aurinkopaneelijärjestelmä jaoteltiin moniin pieniin osa-alueisiin, joita pystyi paremmin tarkastelemaan. Näitä olivat mm: perustukset, pystyrunko ja paneelirunko. Kun jaottelu oli suoritettu valittiin kehitettävä aihealue. Yhden osa-alueen valmistuttua siirryttiin lähtöruutuun uuden ongelman kanssa ja tätä kuvasta 1 näkyvää kehää jatkettiin niin kauan, että runkorakennelma oli valmis.

Tehtävälle tulee aluksi määritellä tavoitteita ja kartoittaa mahdollisia ongelmia. Alussa on hyvä selvittää ongelman ydin ja suunnittelua mahdollisesti rajoittavat tekijät. Näitä voivat esimerkiksi olla jos aikaisemmin kehitetyt rakenneratkaisut, hinta, valmistettavuus, standardit tai turvallisuusmääräykset.

Seuraavaksi kun tiedetään mitä ollaan tekemässä voidaan avoimesti kehitellä hyvinkin lennokkaita ratkaisumalleja tavoitteiden täyttämiseksi. Näiden ratkaisumallien kehittelyyn on hyviä toimintatapoja kuten aivoriihi tai kirjallinen aivoriihi. Yksin työskennellessä lähinnä muiden projektin ulkopuolisten henkilöiden kanssa ongelmista keskusteleminen tuottaa hyviä ideoita. Kun on löydetty tarpeeksi erilaisia ratkaisumalleja voidaan niitä alkaa vertailemaan keskenään ja näin löytää paras suunta mitä lähteä jatkokehittämään. Ratkaisumahdollisuuksia voidaan pisteyttää esimerkiksi niiden ominaisuuksien perusteella. Niitä voivat olla esimerkiksi: turvallisuus, huollettavuus, hinta, ulkonäkö, suorituskky, valmistettavuus ja riskit. Ominaisuuksiltaan halutunlaista vaihtoehtoa lähdetään työstämään ja luonnostelemaan yleisellä tasolla, jolloin ratkaisumallien kartoitus ja luonnosteluvaihe monesti kulkevat rinnakkain projektin edetessä. (Tapani Jokinen, Tuotekehitys)

Luonnostelusta eteenpäin jatkokehiteltäväksi valikoidun ratkaisuluonnoksen kehittelyssä luodaan niin sanotusti lihat luiden ympärille. Luonnoksen avoimet suunnitelmat saavat yksityiskohtaiset suunnitelmat. Asiaan liittyvästä teoriasta haetaan lisätietoa ja perehdytään standardeihin ja muihin oleellisiin määräyksiin. Lisäksi koneenrakennuksessa on tärkeää suorittaa ainakin alustavia luku- ja mitoittavia tärkeitä komponentteja kuten laakereita, ketjuja ja hitsisaumoja. Yleensä tuotteelle suoritetaan tässä vaiheessa ominaisuuksien vertailua esimerkiksi kilpailijoihin ja/tai vanhaan malliin ja suoritetaan tarvittaessa tuotteen lisäkehittelyä ja optimointia parhaan mahdollisen lopputuloksen aikaansaamiseksi. (Tapani Jokinen, Tuotekehitys)

Viimeistelyvaiheessa laaditaan työpiirustukset, kokoonpanopiirustukset, käyttöohjeet ja muut tärkeät dokumentit, mitä tarvitaan tuotteen saamiseksi tuotantoon. Lisäksi raaka-aineet lyödään lukkoon, päätetään mistä hankitaan valmiskomponentit, millaisia pinnankarheuksia ja toleransseja käytetään, miten tuote pinnoitetaan, miten se valmistetaan ja muita oleellisia yksityiskohtia.

4 KUORMITUKSET

Koko projektin suunnittelu aloitettiin selvittämällä lähtötiedoissa määritellyn mukaiseen runkorakenteeseen vaikuttavat kuormitukset. Kuormitusten tunteminen on oleellista mietittäessä rakenneratkaisuja ja varsinkin silloin kun aloitetaan mitoittamaan rakenteita. Suunnitellun runkorakenteen kaksi pääasiallista kuormitustapausta ovat tuulikuormitus ja lumikuormitus. Näiden lisäksi mitoitusvaiheessa on huomioitu rakenteen omasta painosta aiheutuvat kuormitukset.

4.1 TUULIKUORMITUS

Rakenteen toinen määrittävä kuormitustapa on tuulikuormitus. Tuulikuormituksen huomioiminen on erittäin tärkeää suunnitellun kaltaisen aurinkopaneelijärjestelmän kohdalla, jossa tuulipinta-alaa on huomattavan paljon rakenteen muuhun kokoon nähden. Kuormitusta aiheutuu eniten pystyrungon juureen pitkän momenttivarren takia. Laskennan avuksi käytettiin standardia EN 1991-1-4 ja asiaa koskevia kansallisia liitteitä.

4.1.1 Tuulikuormitus paneeleihin

Tuulikuormituksen laskenta aloitetaan määrittämällä rakenteen tulevan paikan tuulennopeuden modifioimaton perusarvo v_b . Standardin kaavaa 4.1 voi käyttää, mutta myös ympäristöministerion Suomelle asettama arvo 21 m/s on yleispätevä. Tässä työssä luotetaan siihen ja käytetään $v_b=21$ m/s.

Seuraavaksi lasketaan tuulennopeuden modifioitu perusarvo v_m (EN 1991-1-4, kaava 4.3).

$$v_m = c_r * c_0 * v_b \quad (1)$$

Rosoisuuserroin c_r saadaan puolestaan kaavalla (EN 1991-1-4, kaava 4.4):

$$c_r = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

Maastokerroin k_r ottaa huomioon ympäröivän maaston. (EN 1991-1-4, kaava 4.5)

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0II}}\right)^{0,07} \quad (3)$$

Rosoisuusmitta z_0 katsotaan standardin taulukosta 4.1. Aurinkopaneelin sijoituspaikkaa kuvaa parhaiten maastoluokitus 3, mihin kuuluu alueet ”joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillaisia tuuliesteitä, kuten kylät, esikaupunkialueet,

pysyvä metsä”. Taulukosta katsomalla $z_0 = 0,3$ m ja $z_{0II} = 0,05$ m. Käyttämällä kaavaa 2 ja sijoittamalla tolpan korkeudeksi $z = 6,5$ m saadaan rosoisuuskertoimelle arvo.

$$c_r = 0,19 * \left(\frac{0,3m}{0,05m}\right)^{0,07} * \ln\left(\frac{6,5m}{0,3m}\right) = 0,662$$

Pinnanmuodostuskerrointa c_0 käytetään jos maaston muodot lisäävät tuulennopeutta yli 5 %. Nopeutta lisääviä tekijöitä ovat esimerkiksi mäet ja jyrkänteet. Tapaukseen oleellisesti vaikuttavia asioita ei ole tiedossa, joten käytetään standardissakin esitettyä suositusarvoa 1,0.

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo saadaan nyt laskettua kaavalla 1.

$$v_m = 0,662 * 1,0 * 21 \frac{m}{s} = 13,912 \frac{m}{s}$$

Seuraavaksi tarvitaan tuulenpuuskien intensiteetille I_v arvo. (EN 1991-1-4, kaava 4.7)

$$I_v = \frac{k_l}{c_0 * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (4)$$

Kaavan 5 pyörteisyyskertoimen k_l arvona käytetään suositusarvoa 1,0. (EN 1991-1-4, 41) Kertoimelle voidaan esittää eri arvo kansallisessa liitteessä, mikäli sellainen halutulle maalle on tehty, mutta Suomen kohdalla arvo on edellä mainittu. Kaikki muut tarvittavat arvot on jo aikaisemmin esitetty, joten pyörteisyyskertoimelle saadaan arvo:

$$I_v = \frac{1,0}{1,0 * \ln\left(\frac{6,5m}{0,3m}\right)} = 0,325$$

Määritetään puuskanopeuspaine, mistä saadaan määritettyä tuulikuorma rakenteelle. Sen ratkaisemiseen tarvitaan edellä mainittujen arvojen lisäksi ilman tiheyden arvoa. Kansallinen liite voi antaa tähän arvon, mutta Suomen kohdalla on tyydyttävä standardin suositusarvoon $\rho = 1,25$ kg/m³.

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (6)$$

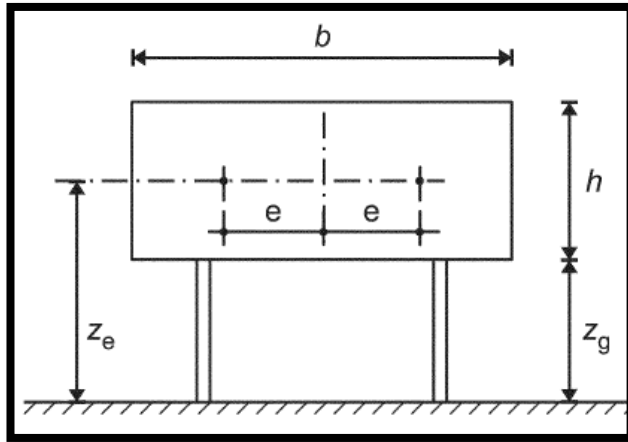
$$q_p = [1 + 7 * 0,325] * \frac{1}{2} * 1,25 \frac{kg}{m^3} * \left(13,912 \frac{m}{s}\right)^2 = 396,278 Pa$$

Rakenteeseen vaikuttava tuulikuorma F_w saadaan kaavalla 7. (EN 1991-1-4, kaava 5.3)

$$F_w = c_s * c_d * c_f * q_p * A_{ref} \quad (7)$$

Rakennekertoimien c_s ja c_d arvona voidaan käyttää lukua 1,0. Standardin luvussa 6.2 on määritelty ehtoja milloin näin voidaan tehdä ja rakenteemme kohdalla pätee sääntö: ”Rakennuksille, joiden korkeus on alle 15 m”. (EN 1991-1-4, 51) Kyseisten kertoimet ottavat huomioon tuulenpaineen huippuarvojen eriaikaisuuden, turbulenssin ja värähtelyn, mikäli niiden huomioiminen on rakenteen kannalta oleellista.

Rakenne voidaan lukea muotonsa puolesta kuvan 2 ilmoituskilven kaltaiseksi rakenteeksi. Voimakerroin $c_f = 1,8$ kun ilmoituskilpi on korkeudella $z_g > h/4$. (standardi, s111). Tuulipinta-ala $A_{ref} = b \cdot h$. Rakenteessa käytettiin suurpiirteistä arvo 18 m^2 .



Kuva 2: Ilmoituskilpi ja sen mitat

Käyttäen kaavaa 7 saadaan viimein arvo tuulikuormalle.

$$F_w = 1 * 1 * 1,8 * 396,278 \text{ Pa} * 18 \text{ m}^2 = 12,839 \text{ kN}$$

4.1.2 Tuulikuormitus pystyrunkoon

Pystyrunkoon aiheutuva voima voidaan laskea ympyräsylintereissä käytettävän voimakertoimen c_{pe2} avulla. Ensin tarvitaan tuulen nopeuden huippuarvo v . (EN 1991-1-4, 122)

$$v = \sqrt{\frac{2 * q_p}{\rho}} \quad (8)$$

Käyttämällä ilman tiheytenä ja puuskanopeuspaineena aikaisemmin määriteltäviä arvoja saadaan tuulen nopeuden huippuarvoksi:

$$v = \sqrt{\frac{2 * 396,278 \text{ Pa}}{1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 25,18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

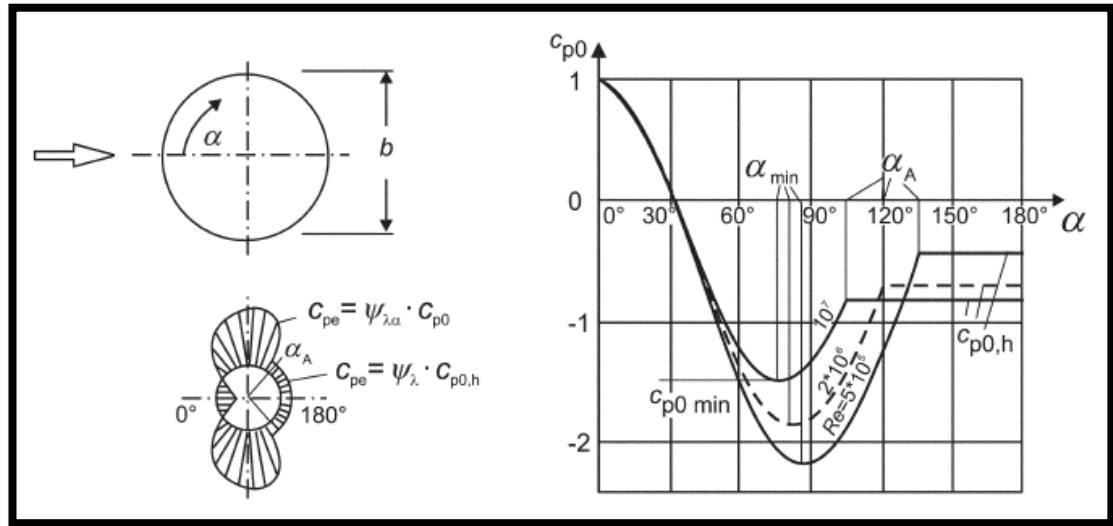
Runkoon muodostuva painekerroin riippuu Reynoldsin luvusta Re .

$$Re = \frac{b * v}{\nu} \quad (9)$$

Kaavassa b on putken halkaisija $323,9 \text{ mm}$ ja ν on ilman kinemaattinen viskositeetti arvolla $15 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. (EN 1991-1-4, 120)

$$Re = \frac{323,9 \text{ mm} * 25,16 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{15 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 543700$$

Ympyräsylinterillä tuulen paine jakautuu moneen suuntaan ja sen suuruus riippuu halutusta tarkastelukulmasta. Tässä tapauksessa meitä kiinnostaa kuitenkin vain paneelien kanssa samassa suunnassa olevat voimat joten tarkastelukulma $\alpha_{kulma}=0^\circ$. Kuvan 3 kuvaajasta saadaan selville, että valitulla kulmalla $c_{p0} = 1$. Pienimmillään se olisi 85° kohdalla jolloin kerroin on -2,2.



Kuva 3: Ympyräsylinterin tuulenpainejakauma

Voimakertoimen suuruuteen vaikuttaa lisäksi standardin kaavan 7.17 mukainen päätevaikutuskerroin. Sen suuruuteen vaikuttaa tarkastelukulman suuruus ja käyrältä katsottu virtauksen irtoamiskohta α_A .

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1 \text{ kun } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{min}$$

Ympyräsylinteriin vaikuttava voimakerroin saadaan kaavalla: (EN 1991-1-4, kaava 7.16)

$$c_{pe} = c_{p,0} * \psi_{\lambda\alpha} \quad (10)$$

Tällä kertaa molemmat kertoimet ovat 1, joten voimakerroin $c_{pe} = 1$. Tuulikuorman vaikutusala lasketaan standardin kaavalla 7.18.

$$A_{ref2} = l * b \quad (11)$$

Korkeus l on rakenteessa 6000 mm ja halkaisija $b = 323,9$ mm

$$A_{ref2} = 6000mm * 323,9mm = 1,943m^2$$

Tuulikuormitus pystyrungolle saadaan kaavan 7 variaationa.

$$F_{w2} = c_{pe2} * q_p * A_{ref2} \quad (12)$$

$$F_{w2} = 1 * 396,278 Pa * 1,943m^2 = 770N$$

4.2 LUMIKUORMITUS

Rakenteen keston kannalta on oleellista ottaa suunnittelussa huomioon rakenteen lumikuormitukset talvella. Vaikka on epätodennäköistä, että paneelijärjestelmää säilytetään talvella lappeellaan antaen lumen kinostua koko paneelipinta-alalle, niin se on kuitenkin ollut lähtökohtana suurimpi lumikuormituksia määriteltäessä. Lumikuormien laskemiseenkin on olemassa eurooppalainen standardi EN 1991-1-3. Kyseisen standardin avulla määriteltiin lumikuormitus suunnitellulle aurinkopaneelijärjestelmälle.

4.2.1 Lumikuormitusten määrittäminen standardin EN 1991-1-3 mukaan

Rakenteessa paneelit muodostavat tasakattorakenteen. Kattojen lumikuormitukset määritellään normaalitilanteissa ja tilapäisissä mitoitusilanteissa kaavalla:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (13)$$

Lumikuormituksen muotokerroin μ_i määritetään kattotyypin muodon mukaan ja sen mukaan miten sille pääsee muodostumaan kinoksia erinäisten muotojen tai lumiesteiden takia. Paneelimme voidaan ajatella olevan loivan pulpettikaton kaltainen, joten standardin taulukon 5.2 mukaan noin 10° katolle on muotokerroin $\mu = 1,067$

Tuulensuojaisuuskerroin C_e saadaan suoraan standardin taulukosta 5.1. Parhaiten oletetun rakennelman sijaintia kuvaa vaihtoehtoista tuulinen, normaali ja suojainen vaihtoehto normaali. Normaali vaihtoehto valitaan kun paikkana on: ”Normaali maasto; alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta.”. Tällä valinnalla $C_e = 1,0$.

Lämpötilakerrointa C_t käytetään ottamaan huomioon lumikuormituksen pienentyminen rakenteista lämpöhäviönä aiheutuvan sulamisen kautta. Kerrointa käytetään jos lämmönläpäisevyys on yli 1 W/m²K. Tässä tapauksessa ei tietenkään tämänkaltaista sulamista tapahdu kun ei ole lämmönlähdettä ja lämpötilakerroin $C_t = 1,0$ (s. 31 kohta 8)

Maanpinnan lumikuormitus s_k on saatavissa standardin liitteestä c. Liitteessä on Euroopan maiden lumikarttoja, mistä voidaan taulukosta C.1 valita suomelle kaava:

$$s_k = (0,790 * Z + 0,375) + \frac{A}{336} \quad (14)$$

Kohteen korkeus meren pinnasta on kaavassa kirjaimella A. Tampereen sijainti meren pinnasta vaihtelee 70-150 m välillä. Hyvä arvio rakennelman korkeudelle merenpinnasta on 90 m. Näin ollen $A = 90$. Kaavassa käytetty ilmastoaluetta kuvaava kirjain Z. Eurooppa on jaettu 10 eri ilmastoalueeseen, missä lumiolosuhteet vaihtelevat. Standardin kuvasta C.8 nähdään Tampereen olevan ilmastovyöhykkeellä 2, jolloin $Z = 2$. Näillä arvoilla maanpinnan lumikuormitukseksi saadaan:

$$s_k = (0,790 * 2 + 0,375) + \frac{90}{336} = 2,223 \text{ kPa}$$

Rakenteen mitoitusta varten arvioitu pinta-ala paneeleille on noin 15 m^2 . Lumikuorma normaalitilanteessa määriteltiin kaavan 13 avulla. Siitä laskemalla rakenteen kuormitukseksi saadaan:

$$s = 1,067 * 1,0 * 1,0 * 2223 \text{ Pa} = 2,372 \text{ kPa}$$

Rakenteeseen vaikuttava voima F_{lumi} saadaan kertomalla tulos arvioidulla pinta-alalla seuraavasti:

$$F_{\text{lumi}} = s * A_{\text{runko}} = 35,577 \text{ kN} \quad (15)$$

5 PERUSTUSTEN SUUNNITTELU

Perustuksia lähdettiin suunnittelemaan siinä vaiheessa, kun tiedettiin pystyrungon olevan pilarimainen rakenne. Kyseisessä tapauksessa oli luonnollista lähteä selvittämään mitä perustusvaihtoehtoja voitaisiin käyttää. Lopulta päädyttiin pilarianturan suunnitteluun, sillä sen valmistaminen on helppoa, ja sen kustannukset pysyvät kurissa jopa ylimitoitustilanteessa.

Pilariantura suunniteltiin olettamalla perustamispaikassa olevan mahdollisuus kaivaa vähintään noin 1,5m kuoppa kohtaamatta peruskalliota ja maaperä olevan hiekkaperäistä. Mitoituskuormituksena käytettiin suurinta tuulikuormitusta paneeleihin, jolloin yhteen suuntaan vaikuttava momentti on 85,95 kNm ja pystyrungon suuntaisena normaalivoimana käytettiin kaikista runkorakenteista syntyvän painoa, mikä oli noin 920 kg.

5.1 Pilarianturan mitoitus

Kantokyky pilarianturalle, johon vaikuttaa pilarin voimainen normaalivoima ja tukimomentti yhteen suuntaan lasketaan kaavalla 16. (Foundation engineerin, Braja M. Das, 150)

$$q'_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (16)$$

Kaavassa c' on maaperän koheesiokerroin määrä eli maaperän keskinäisen vetovoiman suuruus. Hiekkaiselle maalle monissa laskuesimerkeissä käytetään arvo 0, joten sitä käytetään tässäkin tapauksessa.

Kaavassa esiintyvät N_c , N_q ja N_γ ovat maaperän kantokyvyn suureita. Arvot saadaan maaperän leikkautumiskulman perusteella kaavoista 17, 18 ja 19 (Foundation engineerin, Braja M. Das, 137)

$$N_q = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) e^{\pi \tan \phi'} \quad (17)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (18)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi' \quad (19)$$

Kaavan kertoimet F_{cd} , F_{qd} ja $F_{\gamma d}$ ovat perustusten syvyyskertoimia, jotka saadaan perustamissyvyyden mukaan. Kaavat vaihtelevat sen mukaan käytetäänkö Hansenin 1970 kehittämiä kaavoja vaiko Meyerhoffin 1963 kehittämiä. Myös sillä on vaikutusta

onko perustamissyvyys suurempi vai pienempi kuin perustuksen leveys. Laskuissa käytettiin Meyerhoffin kaavoja, mitkä nähdään kaavoissa 20 ja 21.

$$F_{cd} = 1 + 0,4 \left(\frac{D_f}{B} \right) \quad (20)$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B} \quad (21)$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

Kaavan 16 kertoimet F_{cs} , F_{qs} ja $F_{\gamma s}$ ovat anturan muodosta riippuvaisia kertoimia. De Beer suositteli 1970 luvulla muotokertoimiksi kaavoissa 22, 23 ja 24 näkyviä kaavoja.

$$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) \left(\frac{N_q}{N_c} \right) \quad (22)$$

$$F_{qs} = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) \tan \phi' \quad (23)$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0,4 \left(\frac{B'}{L'} \right) \quad (24)$$

Kaavasta 16 lasketulla kantokyvyn arvolla saadaan laskettua suurin voima, jonka perustus kestää kaavalla 25. (Foundation engineerin, Braja M. Das, 150)

$$Q_{ult} = q'_u B' L' \quad (25)$$

Varmuuskerroin saadaan laskettua vertaamalla suurinta sallittua kuormitusta perustuksen suurimpaan pystykuormaan Q kaavan 26 mukaisesti. Pystykuormitus sisältää anturan painon, perustuksen pilariosuuden painon, perustuksen anturan päälle jäävän maan painon ja aurinkopaneelijärjestelmästä syntyvän painon.

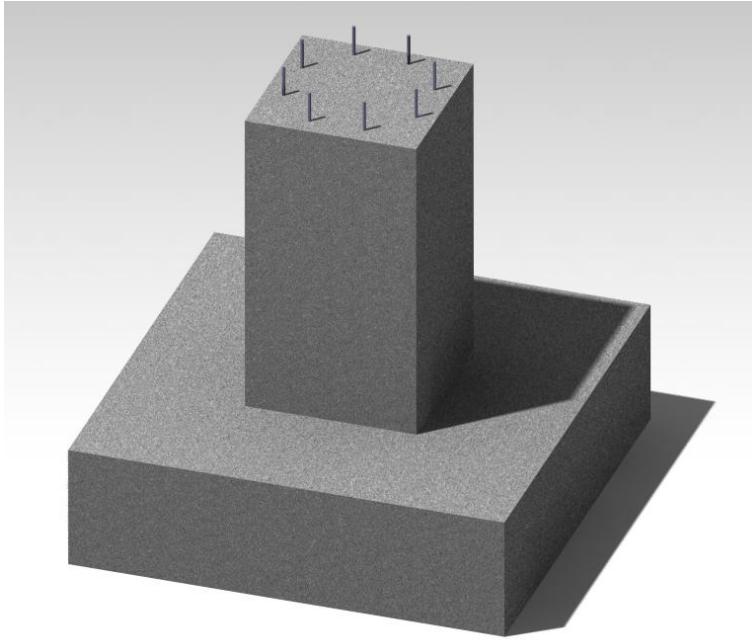
$$FS = \frac{Q_{ult}}{Q} \quad (26)$$

Anturan pohjamittojen jälkeen laskettiin anturalle riittävä paksuus siten, että pilari ei voi leikkautua anturan läpi. Paksuus mitoitetaan huomioimatta tulevan raudoituksen vaikutusta leikkautumiseen. Paksuus mitoitetaan epäkeskeisyyden suuruuden mukaan vaihtuvilla kaavoilla, mutta mitoituksessa käytettiin kaavaa 27. (RIL 125 Teräsbetonirakenteet, Eero Saarinen, 397)

$$d = \frac{1}{1 + 0,3 \frac{f_{ctd}}{p_d}} c_x, \quad (27)$$

missä f_{ctd} on käytetyn betonin puristuslujuus, p_d on anturan suurimman kuormituksen arvo ja c_x on anturan tason leveys keskiosasta reunaan.

Liitteessä 1 on esitetty perustuksen laskut, joista saatiin tulokseksi 1,7 m x 1,7 m x 0,35 m suuruinen antura, minkä perustamissyvyudeksi valittiin 1,35 m. Varmuuskertoimeksi saatiin kyseiselle anturalle 2,9. Kuvasta 4 nähdään suunnitellun pilarianturan muoto.



Kuva 4: Kuva suunnitellusta pilarianturasta

5.2 Perustuksen raudoituksen mitoitus

Perustukseen suunniteltiin raudoitus teräsbetonirakenteiden oppikirjojen ja eurokoodien avulla. Raudoituksen lisäksi pilariin suunniteltiin tolpan kiinnittämistä varten perustukseen upotettava peruspulttiryhmä.

Raudoituksen suunnitteluun tarvitaan lähtötietoina käytettävän betonin ja käytettävän teräksen ominaisarvoja. Tässä työssä antura suunniteltiin valettavan perusbetonilaadusta K25. Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo f_{cd} lasketaan kaavalla 28. Kaavassa α_{cc} ja γ_c ovat betonin puristuslujuuden määräysten mukaisia painotusarvoja.

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} \quad (28)$$

Betoniteräksen myötölujuus lasketaan f_{yd} kaavalla 29, missä γ_s on eurokoodin mukainen mitoituskerroin.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (29)$$

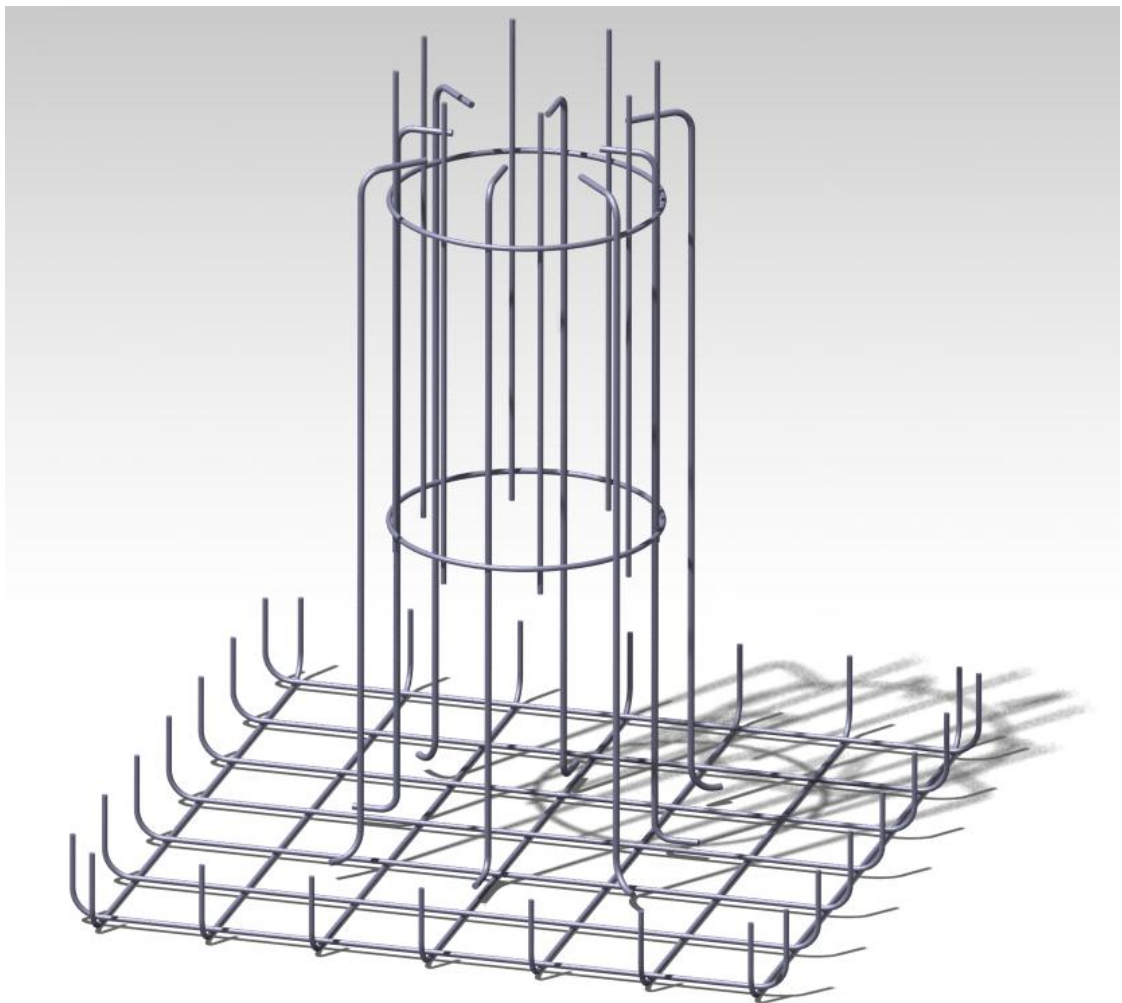
Raudoituksen mitoitukseen tarvittiin vielä anturan suhteellinen momentti, mikä laskettiin kaavalla 30, missä M on anturaan vaikuttava momentti, d on anturan leveys, b on anturan pituus ja d_a on anturan tehollinen korkeus.

$$\mu = \frac{M}{b d_a^2 f_{cd}} \quad (30)$$

Yllä olevilla kaavoilla laskettiin tarvittavan raudoituksen määrä. Raudoituksen määrä kaavan 31 mukaan on:

$$A_s = \left(1 - \sqrt{1 - 2\mu}\right) \frac{f_{cd}}{f_{yd}} bd \quad (31)$$

Laskut on esitetty liitteessä 1. Tulokseksi saatiin noin 585mm^2 , mutta raudoitusta päätettiin lisätä sopivasti koska arvo on suhteellisen pieni ja raudoitusteräs on halpaa. Raudoituksena käytetään 7 kpl 12mm A500HW harjaterästä, jolloin raudoituksen pinta-ala on noin 790mm^2 . Ruuviryhmässä suunniteltiin käytettävän 8 kpl M24 pultteja, sillä rasitukset pilarissa ovat suuria ja pienin sallittu ruuviryhmässä käytettävä ruuvikoko on M20. (Jukka Kinnunen, Teräsrakenteiden suunnittelu, 122) Lopullinen raudoitus ja suunniteltu ruuviryhmä nähdään kuvasta 5.



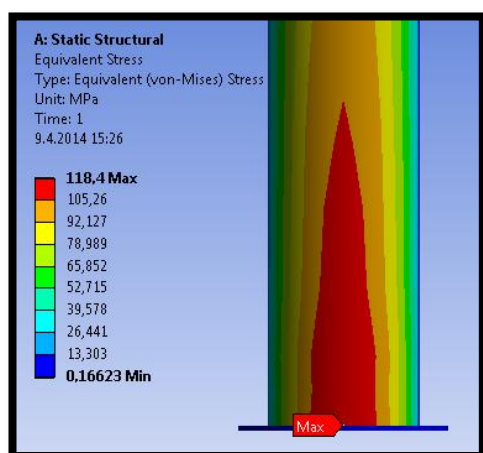
Kuva 5: Pilarianturaan suunniteltu raudoitus ja ruuviryhmä

6 PYSTYRUNGON SUUNNITTELU

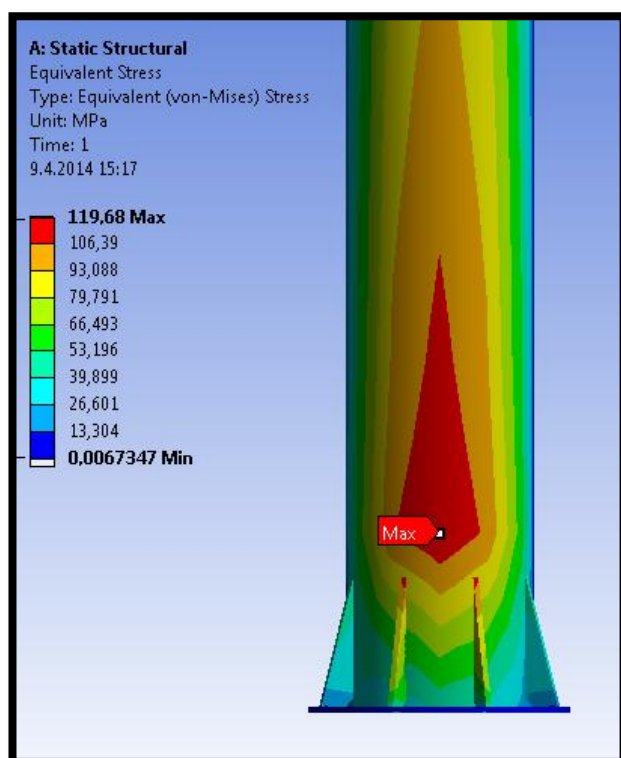
Pystyrunkoa suunniteltaessa oli kovin helppo päätyä valitsemaan yhdestä rakenneputkesta koostuva rakenne. Toki runko olisi voinut olla ristikkorakenteinen tai monesta erikokoisesta putkesta muodostuva rakenne, mutta monet seikat tukivat ensimmäistä vaihtoehtoa. Yhden rakenneputken ratkaisu on yksinkertainen valmistaa ja suunnitella, halpa, kestävä ja esteettisesti näyttävä. Terästukut myös toimittavat rakenneputket 6 metrin tai 12 metrin saloissa joten lähtötietoina esitetty 6 metrin korkeus saavutettiin kuin itsestään.

6.1 Pystyrungon vahvikerivat

Rungon alapäähän muodostuvat huippujännitykset muodostuisivat ongelmaksi jos alapäähän ei suunniteltaisi vahvikeripoja tukemaan pystyrungon ja alalaipan kiinnityskohtaa. Suoraan hitsisaumaan muodostuvat suuret jännitykset todennäköisesti johtaisivat jossain vaiheessa tuulen dynaamisen kuormituksen takia sauman tai pohjalaatan pettämiseen. Kuormien suuruuden, sijainnin ja suunnan vaihtelu altistaa helposti särön kasvulle. Joidenkin lähteiden mukaan 80-90 % rakenneosien murtumista johtuu väsymisestä. (Koneenosien suunnittelu, s.276). Hitsattujen rakenteiden väsymistarkastelussa tärkein suure on jännitysheilahdus eli suurimman ja pienimmän jännityksen erotus. Sen pienentämiseksi asennetaan vahvikkeet, joiden tehtävä on siirtää kuormituksia pois hitsisaumoilta. Jännitysten sijainti hitsisauman tuntumassa ilman ripoja nähdään kuvasta 6. Suunnitellut ripojen vaikutus jännitys jakaumaan nähdään kuvasta 7.



Kuva 6: Pystyrungon alapään jännitys jakauma ilman vahvikkeita



Kuva 7: Pystyrungon alapään jännitysjaakuma vahvikkeiden kanssa

6.2 Pohjalevyn ja pohjalevyn jäykisteiden mitoitus

Pohjalevyn tarkoitus on siirtää pilariin vaikuttavat voimat perustuksiin reunasta alkaen. Jotta näin kävisi, pohjalevyn pitää olla tarpeeksi jäykkä, eivätkä sen kuormitukset saa yltää myötöön asti. Mitoituksen laskut ovat kohtalaisen työläitä ja olisi toivottavaa, että tilaaja teettää tarkemmat laskut esimerkiksi rakennustekniikan ammattilaisella. Nyt kuitenkin resurssipulan ja aikatauluongelmien johdosta tyydyttiin ylimitoittamaan rakenne vahvasti. Pohjalevyn paksuudeksi valittiin 20 mm ja materiaalin hankintateknisintä syistä myös jäykisteet ovat 20 mm paksuja. Teräsrakenteiden suunnittelun esimerkkitapauksiin vedoten katsotaan 20 mm ainevahvuuden riittävän hyvin paljon suuremmillekin kuormituksille. (Jukka Kinnunen, Teräsrakenteiden suunnittelu, s128)

6.3 Pystyrungon lujuuslaskenta

Runkoa suunniteltaessa oli tärkeä päättää perustyyppi rakenteelle, jotta voitiin päästä eteenpäin. Yhdestä 6 metrin rakenneputkesta koostuva rakenne osoittautui helpoimmaksi ja kustannustehokkaimmaksi vaihtoehdoksi. Lujuuslaskennallisesta näkökulmasta pystyrunko on ehkä rungon tärkein rakenne, sillä rikkoutumistilanteessa koko rakennelma olisi käyttökelvoton. Siihen siis keskityttiin erityisen paljon.

6.3.1 Siirtymä

Siirtymiä tarkasteltaessa runko ajateltiin kiinteästi toisesta päästä tuettuna ulokepalkkina. Rakennustekniikassa on yleisesti olemassa siirtymälle raja-arvoja joita tulisi noudattaa. (Teräsrakenteiden suunnittelu, s.24) Tässä työssä asetettiin tavoitteeksi L/150 rajatila. Siirtymiä muodostuu tuulikuorman vaikutuksesta paneelirakenteisiin ja tuulikuorman vaikutuksesta pystyrunkoon. Siirtymän laskemisessa käytettiin kaavoja 32 ja 33, jolloin lopulliseksi siirtymäksi muodostui 59,43 mm. (Tapi Salmi, s440)

$$v_{max\ 1} = \frac{F_w L^3}{3EI} \quad (32)$$

$$v_{max\ 2} = \frac{q_0 * L^4}{8EI} \quad (33)$$

Kyseinen siirtymä ei ole valitun rajatilan L/150 sisällä, vaan on suuruudeltaan noin L/100. Rajatilat ovat kuitenkin ohjeellisia ja on suunnittelijan harkinnassa tulkitaanko ohjeita väljemmin. Mielestäni tulosta voidaan pitää hyvänä, sillä kuormitus joilla kyseiset muodonmuutokset saavutetaan ovat hyvin harvinaisia. Normaalikäytössä jäädään kauas niistä.

6.3.2 Jännitykset

Rakenteeseen muodostuu leikkausjännitystä, vääntöjännitystä, taivutusjännitystä ja normaalijännitystä. Mitoituksen kannalta kuitenkin oleellisinta on tarkastella taivutusjännityksen ja normaalijännityksen yhteisvaikutusta ja mitoittaa pystyrunko niiden mukaan. Jännityksen laskemisessa haluttiin varmuusluvuksi vähintään 1,5 mielellään kuitenkin hieman enemmän. Putkikooksi valittiin lopulta Ruukin S355 323,9x6 rakenneputki. Laskentaa suoritettiin kokeilemalla eri putkien jännitysarvoja, mutta saatavuutensa, hinnan ja riittävän varmuuden takia päädyttiin kyseiseen vaihtoehtoon. Laskemiseen käytettiin lujuusopin peruskaavoja:

$$\delta_t = \frac{M_t}{W} \quad (34)$$

$$\delta_N = \frac{N}{A} \quad (35)$$

Niiden yhteisvaikutuksella muodostui noin 190 MPa jännitystila. Sen varmuusluku putken rakenteen 355 MPa:n myötörajaan nähden on 1,863. Myötöraja on mielestäni riittävän korkea suhteellisten korkeiden mitoituskuormien takia.

6.3.3 Lommahdus

Pitkän puristuksessa olevan sauvan kohdalla on tärkeää ottaa mahdollinen stabiliteetin menetys huomioon. Rakenne saattaa altistua helposti nurjahdusta edesauttaville tekijöille, kuten yhden pään tuennalle, taipumalle ja suurelle taivutusmomentille. Normaalivoimaa runko kestäisi paljon enemmänkin, mutta juuri momentin vaikutus on tarkastettava. Rakennetta lähdettiin tarkastelemaan Ruukin rakenneputkien käsikirjan avulla. Se on tarkoitettu suunnitteluohjeksi ja oppikirjaksi rakenneputkia käytettäessä ja perustuu Eurocode 3:een eli EN 1993 standardeihin. Kaikki laskut on esitetään liitteessä 2. Lähteenä kaikille laskuille on käytetty ruukin rakenneputki käsikirjaa. (https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDF-versio.pdf)

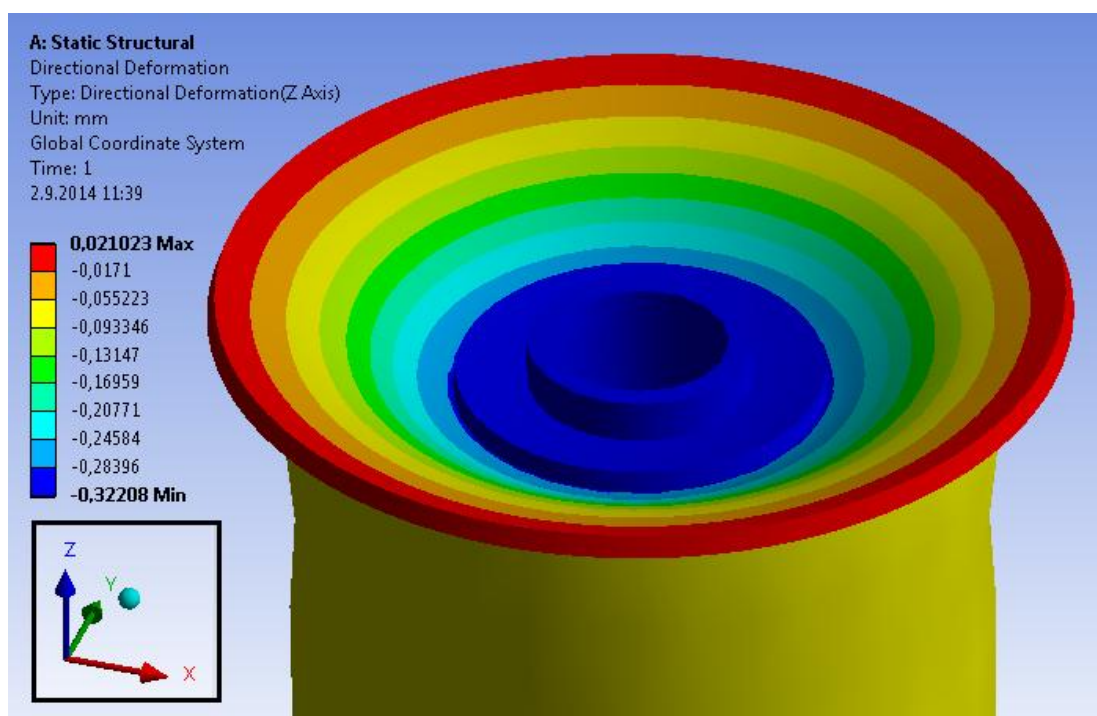
Normaalivoimasta aiheutuvan nurjahduksen suhteen rakenteen varmuudeksi muodostui 16,4. Tulos oli hyvin oletetun kaltainen. Normaalivoiman ja taivutusmomenttien yhteisvaikutuksen alaisena varmuutta oli enää 1,67. Se ei ole paljon, mutta riittävästi jos otetaan huomioon mitoituskuormien suuruus. Lisäksi kaavoihin on sisällytetty epävarmuustekijöitä, jotka lisäävät varmuutta entisestään.

6.4 Pystyrungon yläpää

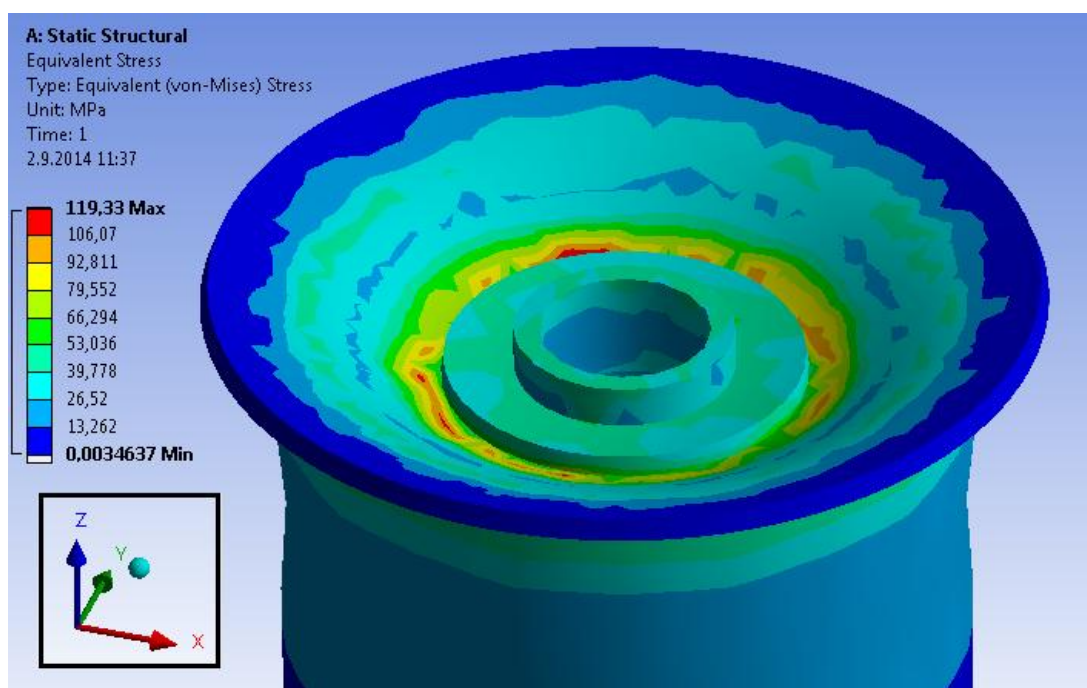
Rungon yläpäähän tarvittiin jokin kiinnitysratkaisu millä ylätasanne saatiin laakeroitua pystyrunkoon kiinni. Helpoin tapa oli suunnitella päätyyn vahva laippa, mihin saadaan jäykästi kiinni laakeripesä tason kiinnitysakselille.

6.4.1 Pystyrungon yläpään lujuustarkastelu

Lopullisesta rakenteesta tehtiin lujuuslaskentamalli, jota käytettiin suurimman tuulikuorman ja lumikuorman alaisena. Lumikuormituksen alla rakenteen käyttäytyminen nähdään kuvista 8 ja 9. Tulokset ovat hyviä ja muutoksia ei tarvinnut tehdä. Suurimman siirtymän on 0,32 mm ja suurin jännitys 119 MPa.

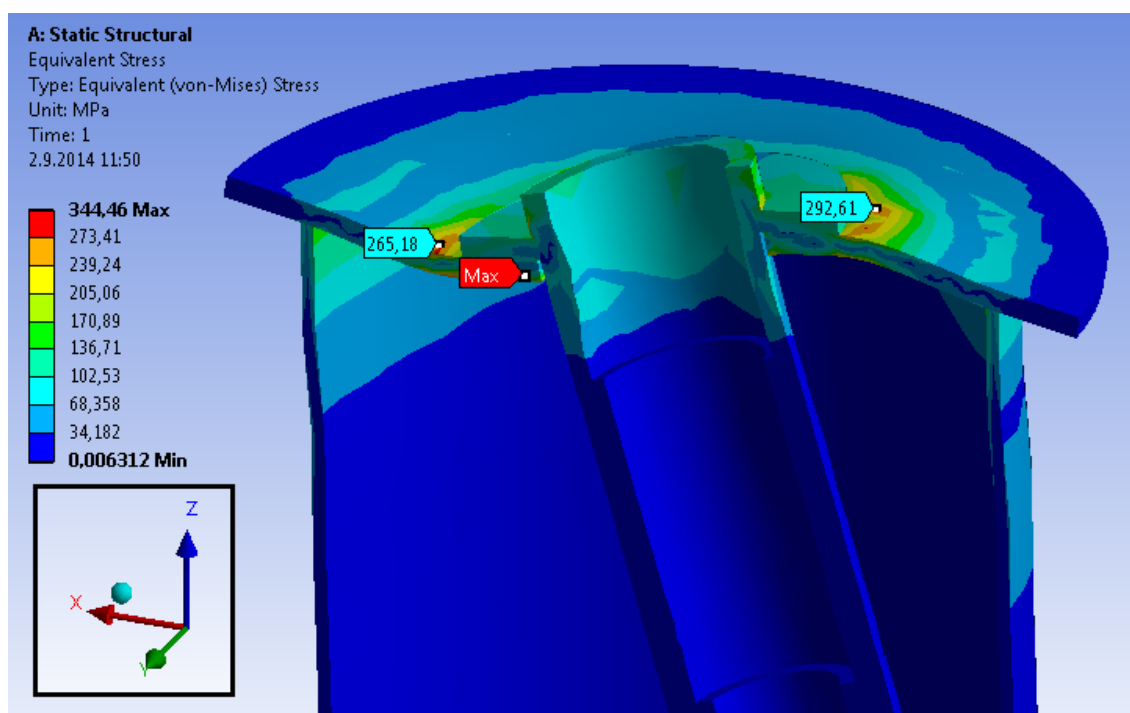


Kuva 8: Pystyrungon päässä muodostuvat pystysiirtymät lumikuormituksen alaisuudessa

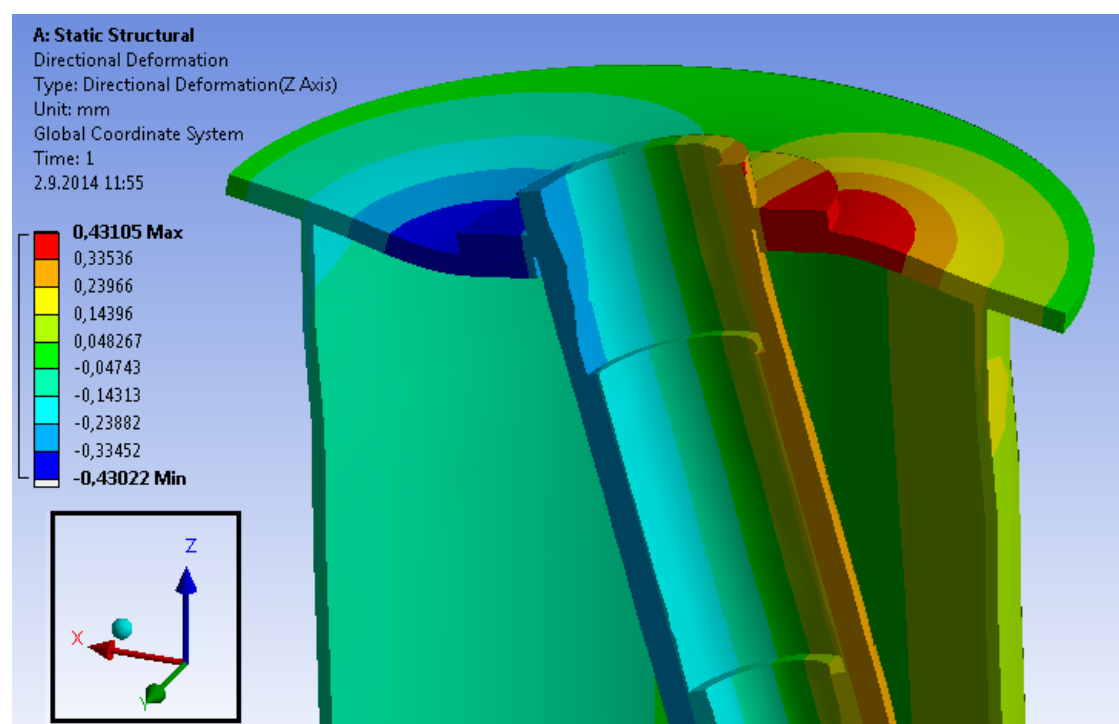


Kuva 9: Pystyrungon päässä muodostuvat vertailujännitykset lumikuormituksen alaisuudessa

Suurimman tuulikuorman rasitus arvioitiin laakeripesän yläpäässä olevan noin 7500 Nm. Sillä kuormituksella rakenteen laskentamalli tuotti tuloksiksi kuvien 10 ja 11 siirtymäkuvan ja jännityskuvan.



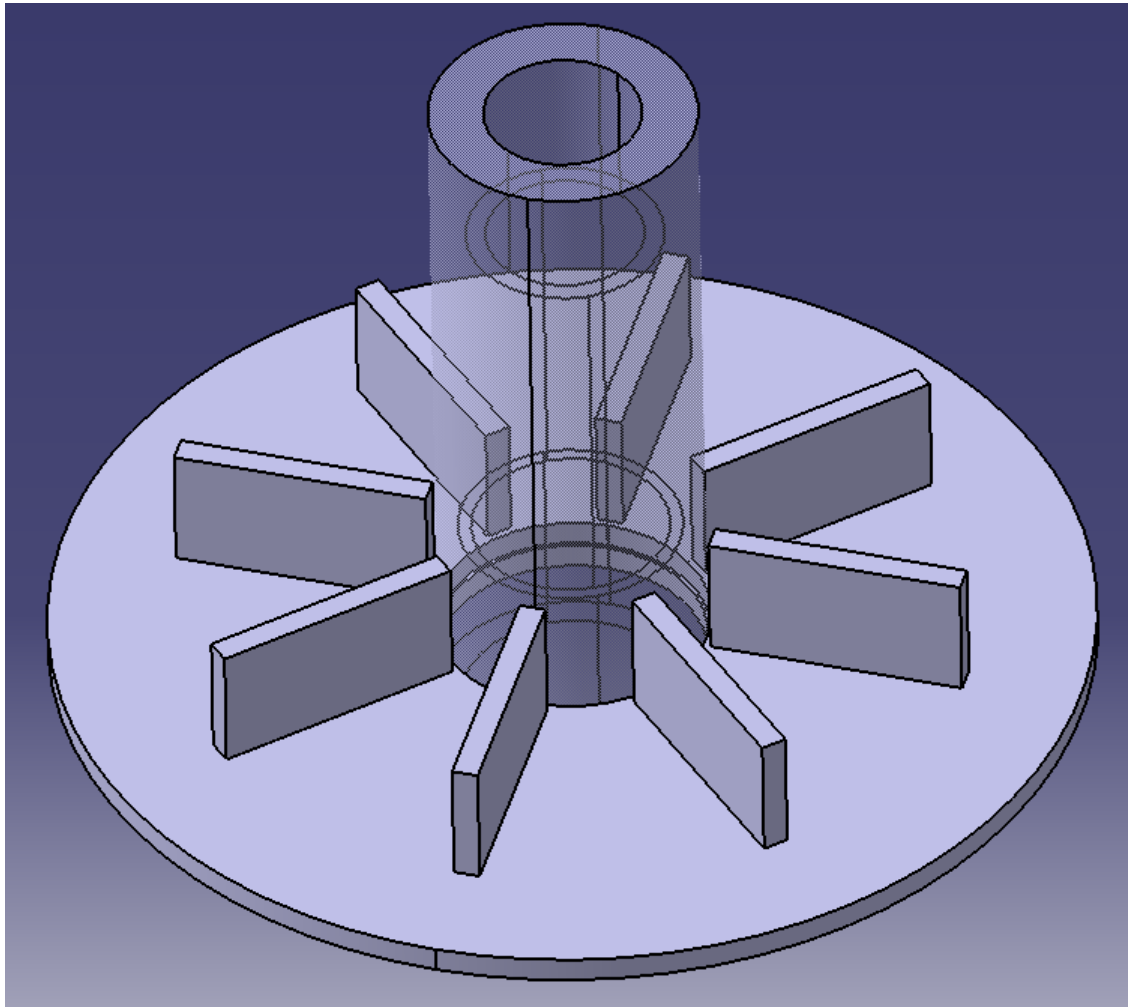
Kuva 10: Pystyrungon päässä muodostuvat vertailujännitykset tuulikuormituksen alaisuudessa



Kuva 11: Pystyrungon päässä muodostuvat siirtymät tuulikuormituksen alaisuudessa

Tuulikuorman suurimman jännityksen ollessa noin 344 MPa ja taipuman ollessa 0,43 mm todettiin jännitysten olleen turhan suuria. Tuulikuormitus on kaiken lisäksi väsymistä aiheuttavaa vaihtokuormitusta.

Ympyrälaatan vahvistamisessa levynpaksuuden nostaminen olisi ollut helpoin ratkaisu. Kuitenkin muissa rakenteissa oli käytetty 10 mm levyä, joten sen käyttäminen oli taloudellisesti perusteltua. Rakenteen vahvistaminen päätettiin toteuttaa lisäämällä laatan alapinnalle kahdeksan säteen suuntaista vahvikelevyä kuvan 12 esittämällä tavalla. Uudet lujuustarkastelut osoittivat vahvikkeiden parantavan rakenteen kestoja ja laskevan jännitustason ja siirtymät hyväksyttävälle tasolle.



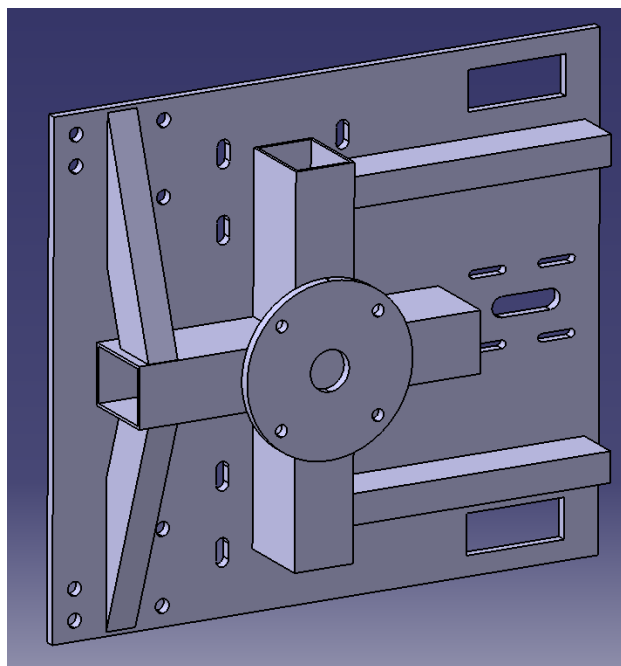
Kuva 12: Pystyrungon yläpäähän suunnitellut vahvikkeet

7 YLÄTASANTEEN SUUNNITTELU

Pystyrungon yläpäähän piti suunnitella rakenne, mikä mahdollistaa halutut pyörimisliikkeet. Lähes ainut järkevä lopputulos ideointivaiheessa oli suunnitella yläpäähän kääntyvä taso, mihin saadaan kiinnitettyä ylärunkorakenteet. Lisäksi tasolle on helposti suunniteltavissa muutkin tarpeelliset rakenteet kuten paneelikulman lukitusjärjestelmä ja sen kääntömekanismi.

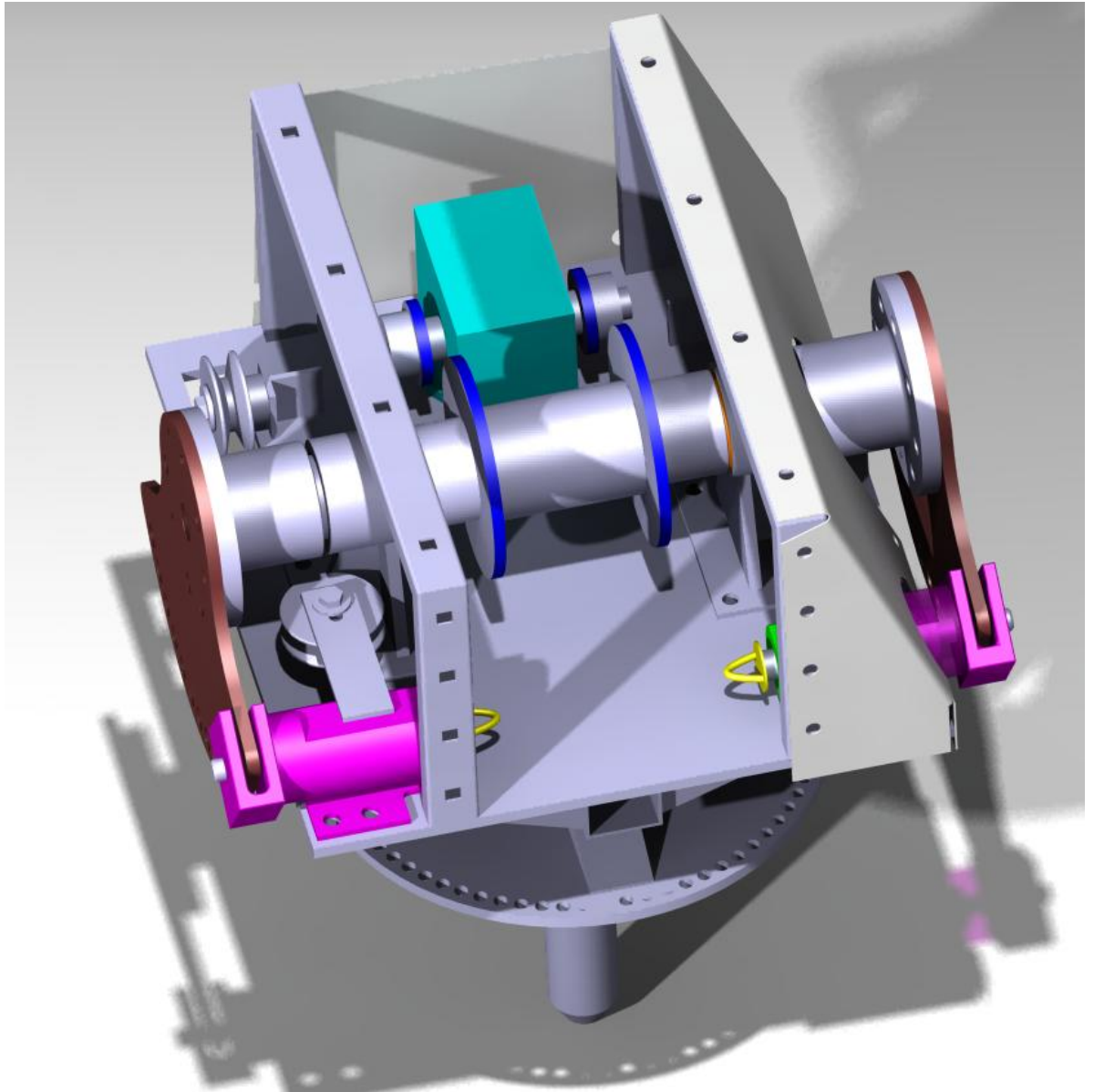
Suunnittelutyön edetessä tasolle jouduttiin mahduttamaan paljon erilaisia rakenteita. Leveyssuunnassa rakennetta haluttiin kuitenkin pitää mahdollisimman kapeana, sillä hyvin raskaasti kuormitettuja ylärunkorakenteita ei haluttu leventää yhtään enempää kuin tarve vaati, sillä taivutusmomentista johtuvat rasitukset olivat jo hyvin korkeita. Lopputuloksena oli hieman ahdas, mutta tehokkaan tilankäytön mukainen ratkaisu.

Tasanne on luonnollisesti hyvin kuormitettu rakenne, joten se päätettiin toteuttaa jäykästä 10 mm levystä ja siihen hitsatuista jäykistepalkeista. Jäykistepalkkien sijoittelua rajoitti ylätasoon kiinnitettävien osien pulttiliitoksen vaatima tila tason alapinnalla. Kiinnityksien ja vahvikkeiden sijoittelussa onnistuttiin kuitenkin kohtuullisesti, jolloin saatiin lopputulokseksi kuvan 13 kaltainen rakenne. Tukipalkkeina pyrittiin käyttämään jo muista rakenteista löytyviä putkiprofiileita.



Kuva 13: Ylätasanteen alapinnan vahvikkeet

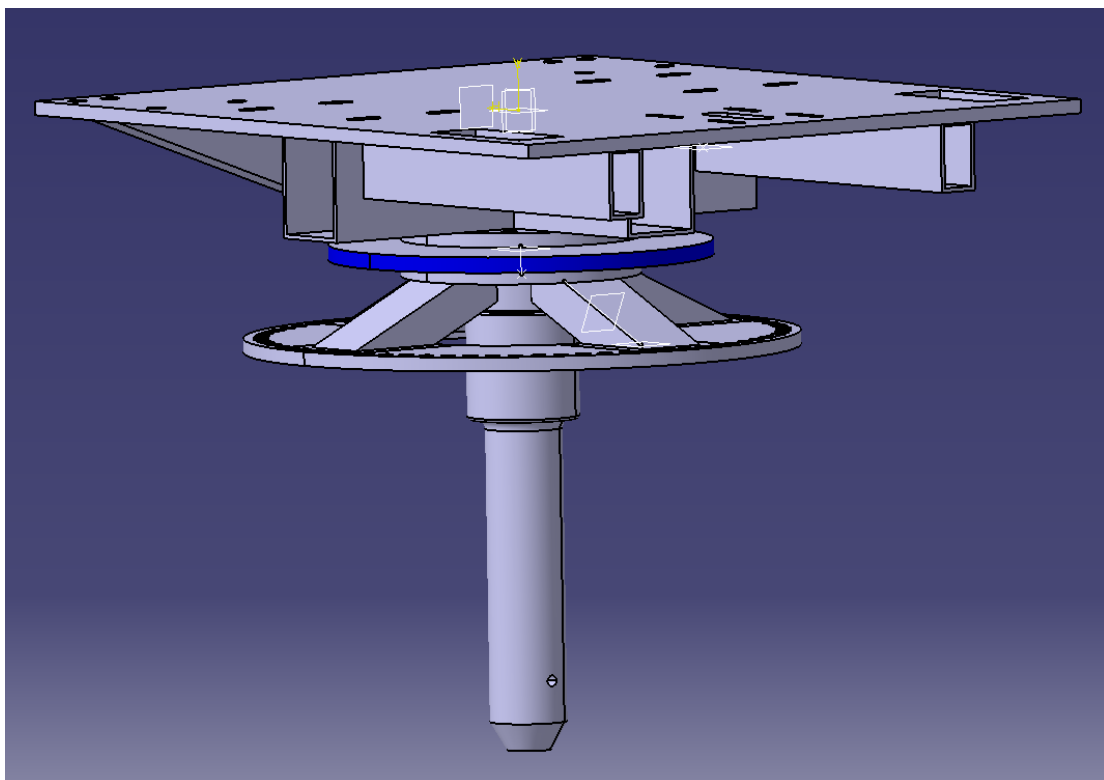
Ylätasolla sijaitsee tärkeitä komponentteja mekanismin kannalta, joten ne haluttiin suojata epäsuotuisilta sääilmiöiltä. Siksi tasanteen komponenttien suojaksi suunniteltiin ohutlevystä särmättävä yksinkeirtainen kotelorakenne. Mekanismit ja muu vaativat kuitenkin huoltoa, joten katteisiin suunniteltiin helposti irroitettavat pulttiliitokset eri pintojen irrottamiseksi. Katteet ja lopullinen ylätaso nähdään kuvassa 14.



Kuva 14: Ylätasanteen lopullinen kokoonpanokuva

7.1 Ylätason akselin rakenne

Ylätason tuli olla pystyakselin suhteen kääntyvä, joten siihen tuli suunnitella akselointi. Laakeripesän rakenne käytiin läpi aikaisemmin kohdassa pystyrungon yläpää. Akselille jouduttiin suunnittelemaan ilmansuunnan käännön lukituksen vaatima lukituslevyratkaisu. Ratkaisu toteutettiin kiinnittämällä tukipalkeilla lukituslevy akseliin ja kiinnityslaippaan. Rakenne toki vaatiin hyvää valmistustarkkuutta, mutta on täysin mahdollista toteuttaa hyvin valvomalla valmistusta ja kokoonpanoa rakennetta tehdessä. Ylätason suunniteltu rakenne nähdään kuvasta 15.



Kuva 15: Ylätasanteen pystyakseli

Ylätaso ja ylätason akseli kiinnitetään laippaliitoksella toisiinsa suurlujuuspulteilla. Laippaliitoksen väliin tulee levyketjupyötä, mihin kiinnitetään ilmansuunnan käännön mekanismi 12B rullaketjulla.

Tulevaisuutta ajatellen jos rakenne olisi ollut joksus tarkoitus automatisoida seuraamaan aurinkoa, niin akselin laakerointiin tulisi kiinnittää erityistä huomiota. Suuren kääntelymäärän takia laakereiden rasvausmahdollisuus tulisi mahdollistaa. Akseli suunniteltiin ontoksi, jotta pystyrungon sisälle tuleva alempi laakeri voidaan rasvata

ylhäällä olevan rasvanipan kautta. Liitteestä 18 olevasta työpiirustuksesta ratkaisu näkyy selkeämmin.

7.1.1 Ylätason lujuuslaskenta

Ylätason lujuuslaskenta tehtiin Ansys-ohjelmiston laskentamallin avulla. Lähinnä tarkasteltiin, ettei taipumat ole kovinkaan suuria, sillä oletuksena oli ettei vertailujännitykset ole kovinkaan suuria. Tulosten analysoinnissa ei huomattu mitään erikoisempaa epäkohtaa suunnitellussa rakenteessa, joten tason rakenne pidettiin suunnitellun mukaisena.

7.1.2 Ylätason akselin lujuuslaskenta

Akselin osalta laskennassa tyydyttiin käsinlaskemalla selvittämään karkeasti taivutuksen ja leikkauksen osalta tarpeeksi suuri akselin halkaisija. Käsinlaskennassa joudutaan tekemään suuria yksinkertaistuksia, mutta epävarmuustekijöitä kompensoitiin kasvattamalla akselinpaksuutta pienimpään sallittuun paksuuteen nähden.

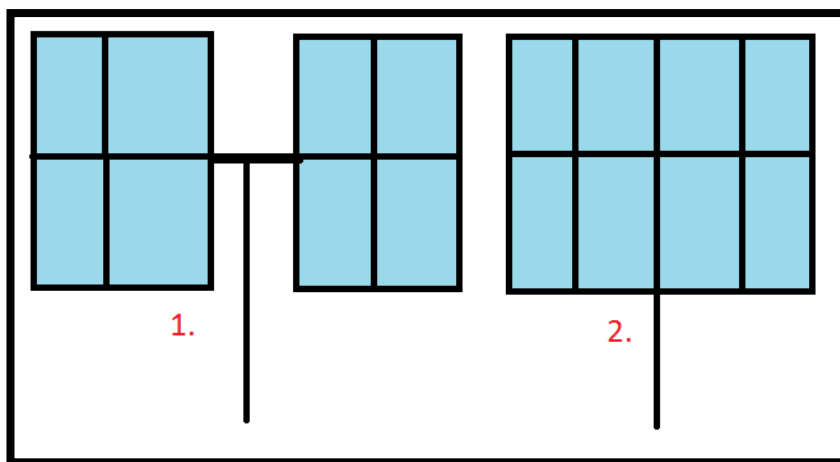
Siirtymä laskettiin olettamalla akseli ohuimman kohdan paksuiseksi ulokepalkiksi. Ulokepalkin pituus on tällöin ylemmästä laakeritasosta pääakselin korkeudelle eli pituudeltaan 500 mm. Palkkiin vaikuttaa tuulikuorman aiheuttama leikkausvoima 12,8 kN ja siitä aiheutuva taivutusmomentti 5,96 kNm. Käyttämällä kaavoja 34 ja 35 saadaan leikkausjännitykseksi 5,4 MPa ja taivutusjännitykseksi 364 MPa akselin halkaisijaksi ollessa ohuimmasta 55 mm. Hyvin suuren taivutusjännityksen takia akselimateriaaliksi valittiin myötörajan S420 rakenneteräs. Lisäksi pitää kuitenkin huomioida, että akseli ei todellisuudessa ole ulokepalkin kaltainen, vaan on esimerkiksi tuettuna laakerin päätylaipan kohdalta, missä akselin halkaisija nousee 80 mm suuruiseksi.

8 YLÄRUNGON SUUNNITTELU

Ylärungon suunnittelun lähtökohtana oli tehdä rakenne, jossa on kiinni kaikki 8 paneelia ja sitä voidaan kääntää maasta käsin. Sen olisi oltava myös mahdollisimman kevyt ja teknisesti toteutettavissa oleva. Rakenteen tulisi kestää myös sille asetetut kuormitukset rikkoutumatta. Suunniteluvaiheessa tutustuttiin muihin maailmalla rakennettuihin kääntyviin aurinkopaneelijärjestelmiin ja saatiin hyviä ideoita sitä kautta.

8.1 Ylärungon perusrakenne

Suunnittelun alkuvaiheessa jo oli selvää, että rakenteen on oltava suuren kokonsa puolesta jonkinasteinen ristikkorakenne. Ristikon avulla saavutetaan kevyt ja jäykkä rakenne, mitä tässäkin tapauksessa tavoiteltiin. Suunnittelutyön edetessä vaihtoehtoiksi muodostuivat kuvassa 16 esitellyt vaihtoehdot 1 ja 2.

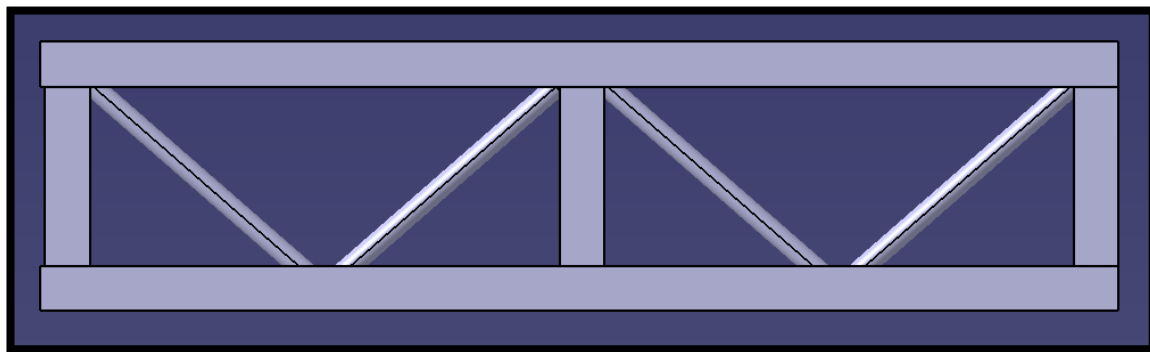


Kuva 16: Ylärungon perusrakenteen vaihtoehdot

Rakenne 2 olisi jäykempi ja kevyempi, mutta sen käytössä olisi ollut suuria ongelmia painopisteen sijainnin kanssa ja kääntömekanismin suunnittelussa. Rakenteen painopiste olisi väkisinkin sijainnut korkeussuunnassa paneelien keskellä jolloin kääntöakseli olisi sijainnut kaukana siitä, jolloin jo valmiiksi monimutkainen kääntökoneisto olisi joutunut kestäämään rakennelman painosta muodostuvan lisärasitteen. Lisäksi sen omat rakenteet saattaisivat helposti olla tiellä paneelien kulmaa muutettaessa ja näin estää kääntämisen kokonaan. Rakennetta kehitettiin vaihtoehdon 1 mukaiseksi. Valintaa puoltavat ainakin painopisteen hallinta ja käännettävyyden takaaminen.

8.1.1 Ylärunгон keskituen suunnittelu

Keskituki suunniteltiin ristikkorakenteeksi. Valittavana oli K-, N-, T- tai KT-liitoksilla varustettu rakenne. Sopivimmaksi valittiin KT-liitoksellinen ristikko, sillä sen rakenne on hyvin jäykkä ja 3 vertikaaliputkea mahdollistavat helposti sivutukien hitsaamisen rakenteen kylkeen. Rakenteesta muodostui kuvan 17 näköinen.

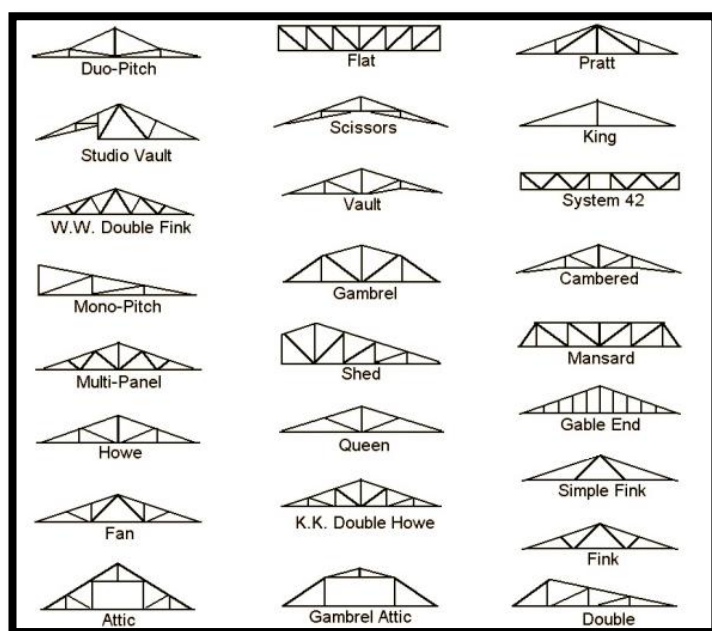


Kuva 17: Ylärunгон keskituen ristikkorakenne

Rakenteen ylä- ja alapaarteissa, sekä vertikaaleissa käytetään suorakaideputkea sivutukien hitsattavuuden helpottamiseksi. Aina on helpompi hitsata ja leikata suoria pintoja toisiinsa kuin kaarevia muotoja. Lisäksi suorakaide antaa lisää jäykkyyttä juuri siihen suuntaan, mihin suurimmat voimat oletettavasti muodostuvat. Ristikko on tietoisesti tasapaksu, vaikka kuormitus pienenee mitä kauemmas pystyrungosta mennään. Tasakorkean ristikon valmistus on kuitenkin työteknisesti halvinta ja sivutukien alaosat pitää kuitenkin kiinnittää johonkin, joten päädyttiin tasakorkeaan ristikkoon. Ristikon korkeudelle on taloudellisesti ja keston kannalta olemassa suosituksia. Yleensä korkeus on jänneväliin L suhteutettuna $L/12 - L/9$. Rakenteessa päädyttiin noin $L/9$ -luokkaan. Jänneväli koko rakenteella on 5440 mm, jolloin korkeudeksi valittiin 600 mm. (Teräsrakenteiden suunnittelu, s.84)

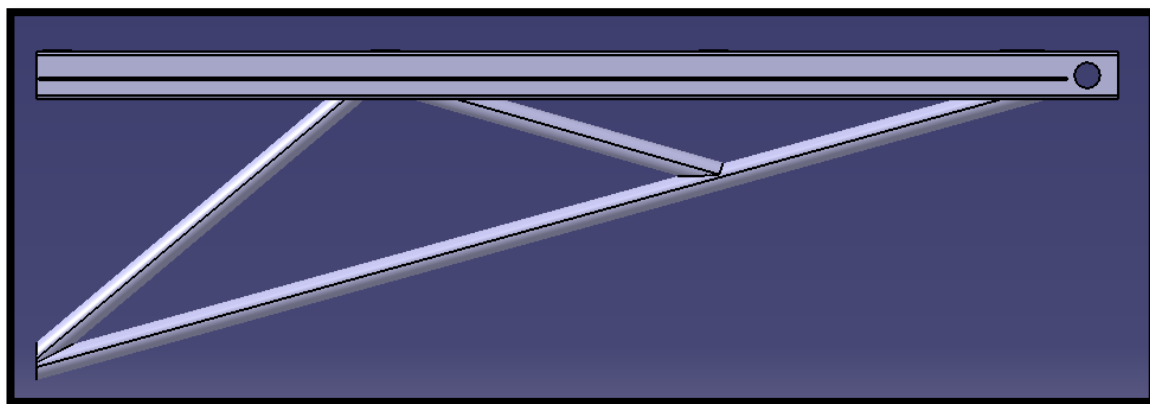
8.1.2 Ylärunгон sivutuen suunnittelu

Sivutuen rakenne on myös ristikko. Sen kohdalla kuitenkin päädyttiin tekemään vino ristikko, sillä kuormitus palkin päässä on vähäistä. Muodon valinnassa käytettiin tervettä järkeä mietittäessä montako diagonaalia suunnitellaan. Mallia otettiin hieman kattoristikoista, joita on esitetty kuvassa 18. Erilaisia versioita mallinnettiin lujuuslaskentaohjelmalla useita ja sopivimmaksi muodostui kuvan fink- rakenne.



Kuva 18: Esimerkkejä mahdollisista ristikkorakenteista

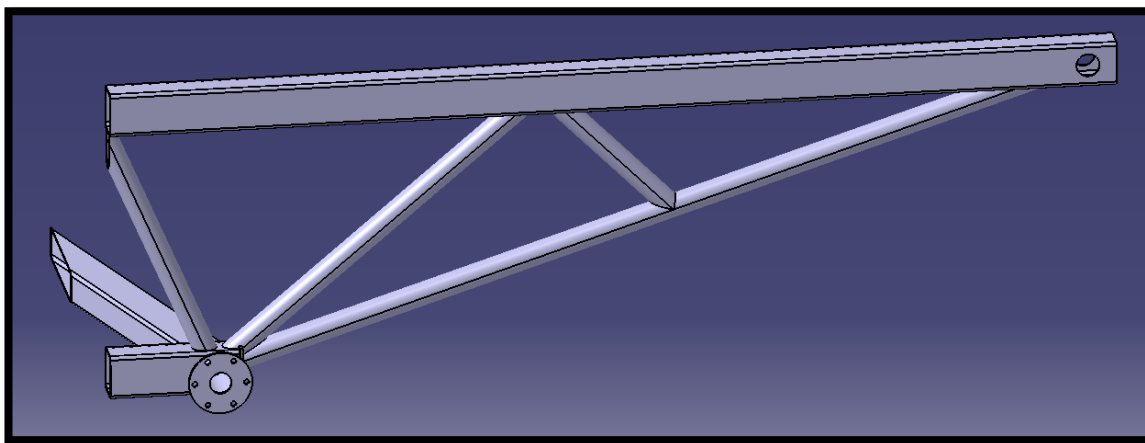
Lopullinen tulos nähdään kuvassa 19. Rakenteen yläpaarre on suorakaide paneelien kiinnityksen helpottamiseksi. Pyöreät diagonaalit on myös helpompi valmistaa, kun molemmat päädyt eivät ole kaarevia pintoja.



Kuva 19: Ylärunгон sivutuen ristikkorakenne

8.1.3 Keskiosan sivutuen suunnittelu

Rakenteen keskelle muodostui ongelmallinen kohta, missä ylärunгон keskiosan alapaarre menisi pystyrungon läpi tai ainakin estäisi laitteen käyttämisen/asentamisen. Ongelma ratkaistiin suunnittelemalla keskelle molemmin puolin sivutuet, missä on pieni alapaarre. Alapaarre toisi keskituen alaosa sen verran sivulle, että puoliskot saadaan tuettua myös alhaalta. Rakenteellisesti alaosan tuenta on erittäin oleellinen, sillä muuten ristikko taipuisi kohtuuttoman paljon keskeltä ja rakenne olisi käyttökelvoton. Suunniteltu rakenne nähdään kuvasta 20.

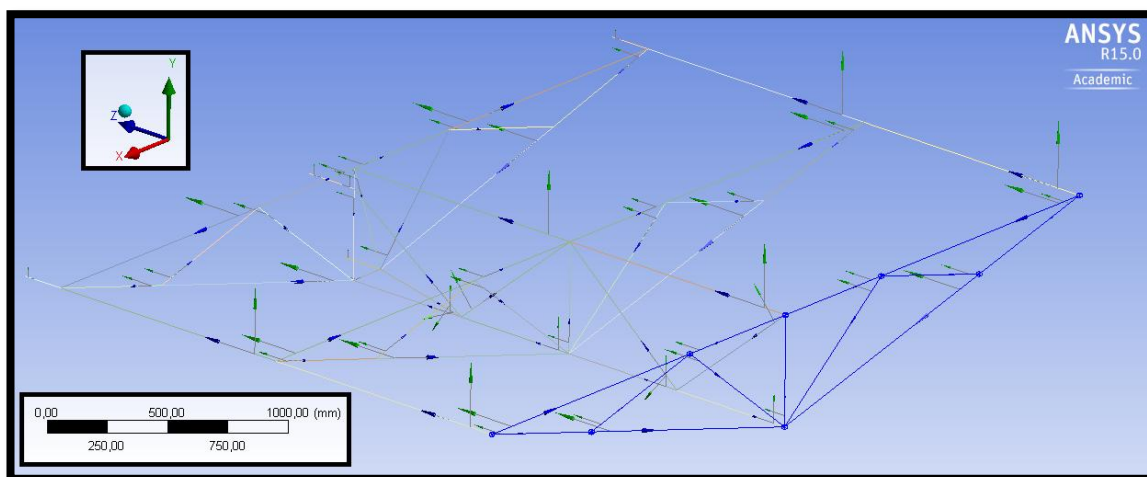


Kuva 20: Erilaisten sivutuen rakenne

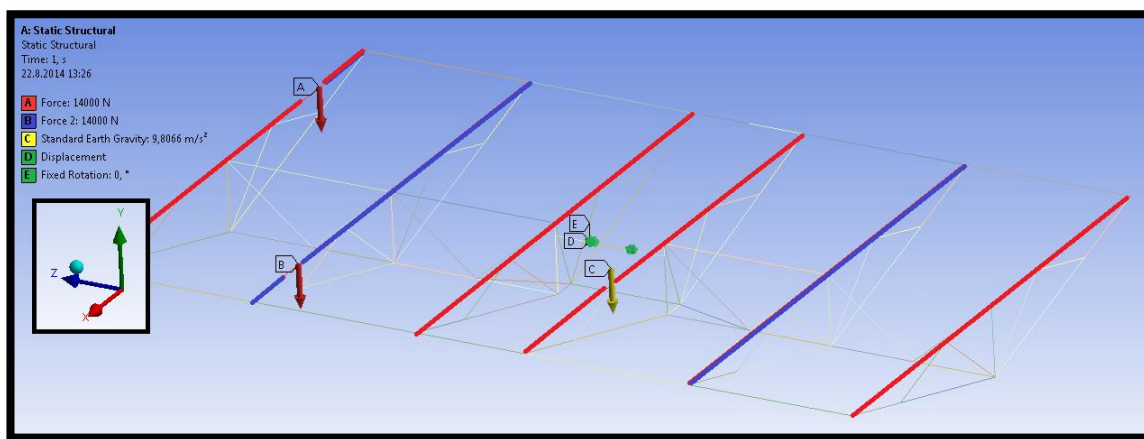
Rakenne perusosaltaan muodostui samankaltaiseksi, kuin muutkin sivutuet. Alhaalla nähdään kuitenkin lisätty alapaarre, mikä on jouduttu tukemaan kahdella ylimääräisellä diagonaalilla. Kyseinen rakenne joutuu kovien kuormitusten alaiseksi, joten senkin takia tuenta on niin järeä.

8.2 Ylärunon lujuuslaskenta

Ylärunon lujuuslaskenta aloitettiin mallintamalla ylärunon kokonainen puolikas Ansys -ohjelmistolla. Rakenne mallinnettiin viivoina, joille asetettiin haluttu poikkileikkaus. Rakenteen geometria kuvassa 21 ilman poikkileikkauksia. Lakentamallin tuennat ja kuormitukset nähdään kuvasta 22, missä punaiset viivat ovat 7000 N viivoja ja siniset 14000 N viivoja. Lisäksi on asetettu omasta painosta johtuva gravitaatiovoima mukaan ja tuettu kappale vihreiden pallojen kohdalta.



Kuva 21: Mallinnetun rakenteen geometrian puolikas



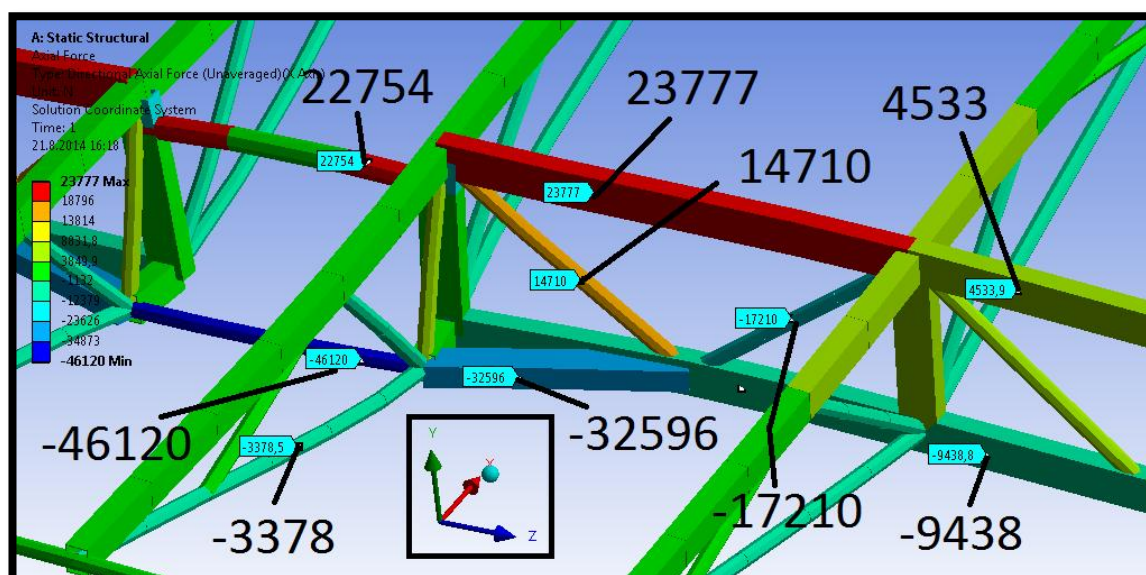
Kuva 22: Paneelirungon lujuuslaskentamallin kuormitukset ja tuennat

Poikkileikkauksia lähdettiin hakemaan kokeilemalla erin kokoisia putkia eri kohtiin. Loppujen lopuksi päädyttiin valitsemaan Kolmesta eri putkesta koostuva ristikko. Keskiosan ylä- ja alapaarre, sekä keskiosan vertikaalit ovat RHS 100x50x4. Sivutukien yläpaarre ja erilaisen sivutuen alapaarre ovat RHS 80x60x3. Lähes kaikki pyöreät putket ovat rakenneputkea CHS 42,2x3.

Poikkileikkaukset asetettiin oikeille viivoille ja saatiin laskettua rungon siirtymät ja normaalivoimat, sekä nähtiin palkkeihin muodostuvat vääntömomentit ja taivutusmomentit. Optimaalisessa ristikkorakenteessahan ilmenisi vain normaalivoimia, mutta ristikkomme on monessa mielessä epäoptimaalinen. Esimerkiksi runkojen yhdistävä kääntöakseli ei yhdistä keskiosan yläpaarteita niiden kohdalta, vaan painopisteen korkeudelta. Kuormituksetkaan eivät ole vain solmujen kohdalla, vaan jakautuvat epäoptimaalisesti.

8.2.1 Normaalivoimat

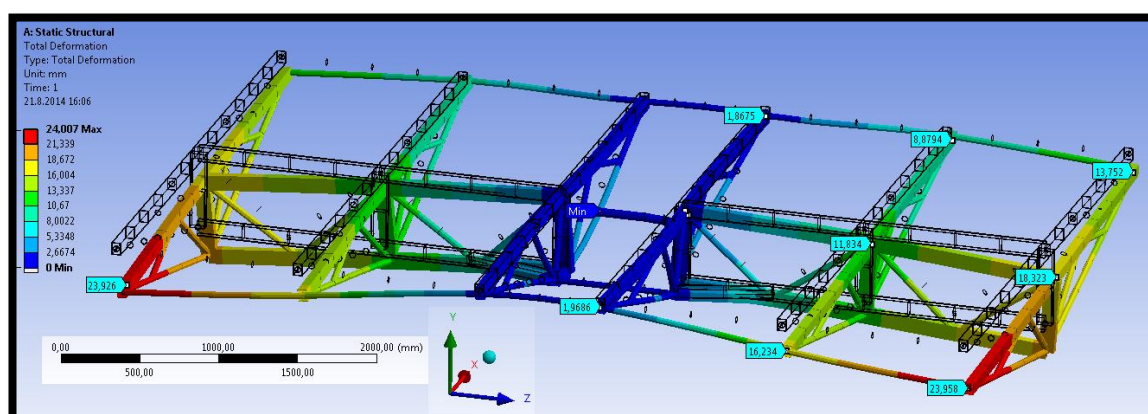
Runkoon muodostuu kuvan 23 mukaisia normaalivoimia. Suuruusluokaltaan voimat eivät ole kovinkaan suuria muualla kuin keskiosan liitoskohdissa. Normaalivoimia tarkastellessa tärkeimpiä tarkastelun kohteita ovat normaalijännitys ja nurjahdus. Liitteessä 5 on esitetty paneelirunkojen väliputken tarkastelu, minkä puristusvoima on 46120 N. Tuloksena saatiin varmuutta nurjahdukseen yli 15 ja myötöön nähden 3,875. Vaikka näyttäisi, että putki kestää sen, niin valitaan kuitenkin järeämpi putkikoko varmuuden vuoksi. Kustannuksiltaan putkikoon vaihdolla ei ole merkitystä, mutta rakenteen kestävyys korkeasti kuormitetuilla alueilla voidaan näin taata. Putkikooksi valitaan CHS 60,3x4.



Kuva 23: Normaalivoimia eniten kuormitetuissa rakenteissa

8.2.2 Siirtymät

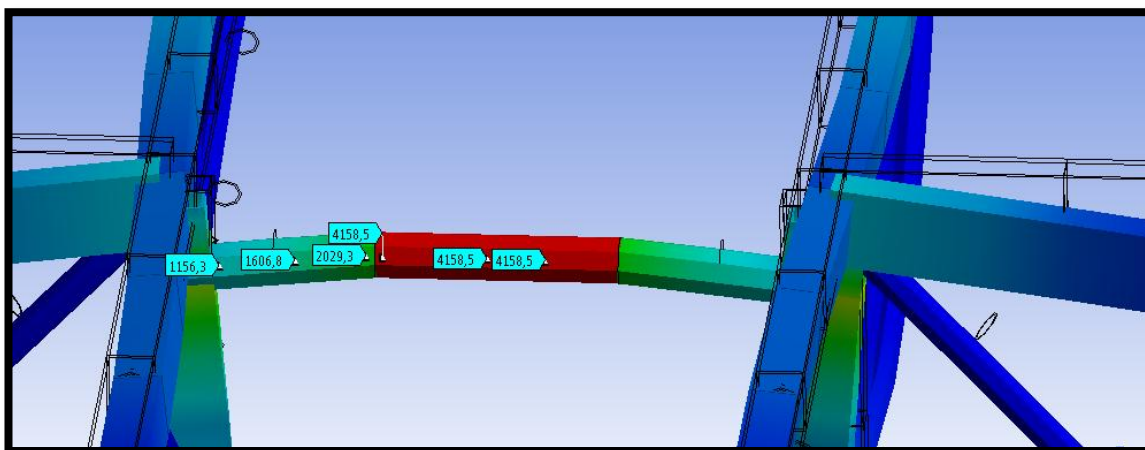
Siirtymät olivat yksi päämitoitussuure putkien kokoja mitoitettaessa. Alkutietojen mukaan paneelien olisi tarkoitus olla jonkinasteinen mittalaitteisto samalla. Paneelien olisi oletuksena osoitettava haluttuun suuntaan, mikä on perin vaikeaa jos rungon taipuman takia kulma on jo oletuksena väärä. Paneelit eivät myöskään kestä taivutusta juuri yhtään, joten siirtymät olisi pidettävä kurissa. Rakennetta lähdettiin mitoittamaan asettamalla maksimisiirtymäksi 30 mm. Valituilla runkorakenteilla siirtymiksi muodostui kuvassa 24 näkyvän kaltainen tulos. Suurin siirtymä on 24 mm. Siirtymät ovat siis hyvin hallinnassa.



Kuva 24: Ylärungon siirtymäkuva

8.2.3 Taivutusmomentti

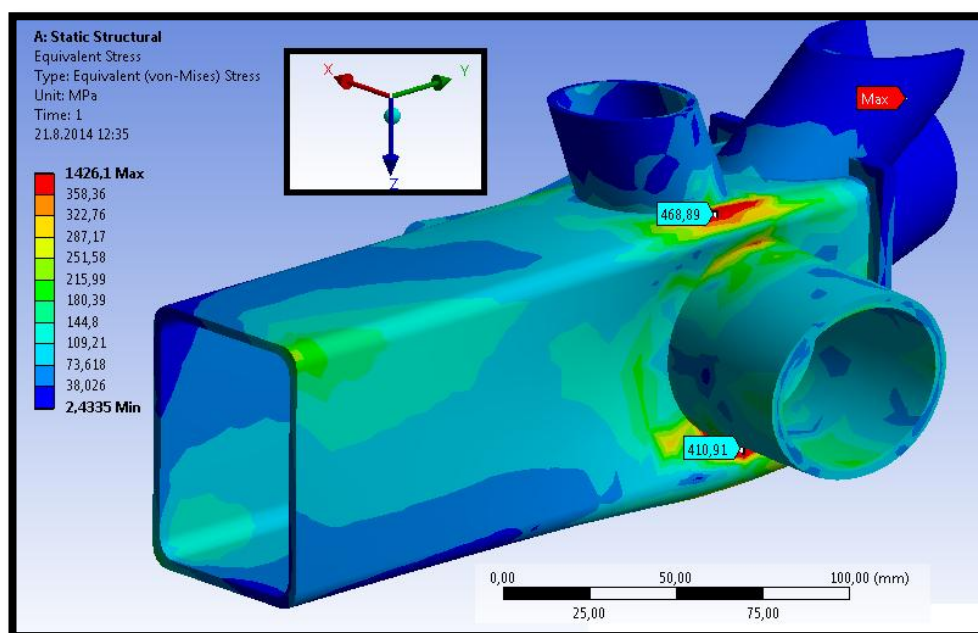
Taivutusmomenttia muodostui erityisen paljon rakenteen ainoan tuennan kohdalle. Puoliskot on tuettu samalta akselilta, mitä pyörittämällä paneelien kulmaa tullaan kääntämään. Kyseisen akselin mitoituksen kannalta on siis oleellista tietää, että sille tulee suuria taivutusmomentteja. Kuvassa 25 on esitetty pääakseliin kohdistuvat taivutusjännitykset. Erityisen paljon vääntöä tulee akselin keskelle n. 4160 Nm ja laakeroinnin toiselle puolelle n. 2000 Nm. Akselin mitoitus on esitetty luvussa 9.1 pääakselin suunnittelu.



Kuva 25: Pääakselille syntyvät taivutusmomentit

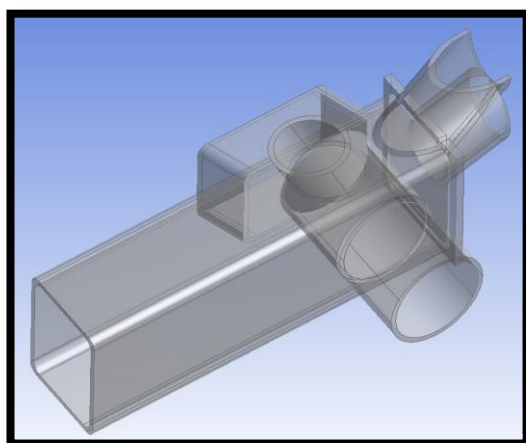
8.2.4 Erilaisen sivutuen tarkastelu

Erilaisen sivutuen alapaarre joutuu hyvin suurien voimien alaiseksi. Siksi siitä mallinnettiin erillinen lujuuslaskentamalli, jonka avulla voitiin selvittää rakenteen kesto kyseisessä kohdassa. Malliin asetettiin lujuuslaskentamallin mukaiset normaalivoimat ja tuettiin alapaarteeseen vapaasta päästä kiinteällä tuennalla. Tulokseksi saatiin kuvassa 26 näkyvät tulokset. Mallista löytyy jopa 460 Mpa jännityksiä ja laajoilta alueilta yli 280 Mpa jännityksiä. Yhteenvedona voidaan todeta paikoitellen löytyvän myötörajan selkeästi ylittäviä arvoja ja rakenne sellaisenaan on käyttökelvoton. Alapaarre ei selvästikään kestä sen molemmille kyljille hitsattuja suurten voimien alaisia diagonaaleja, vaan painuu lommolle, menettää stabiliteettinsa ja murtuu.



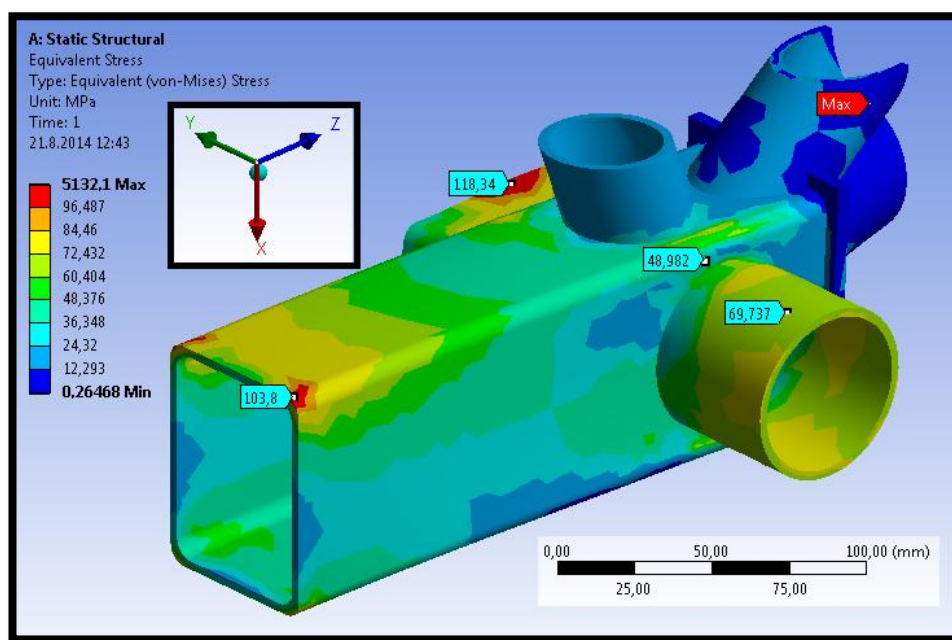
Kuva 26: Rasitetun alapaarteen jännitykset

Korjaavana toimenpiteenä suunniteltiin rakenteeseen sellainen muutos, että vaakatasossa oleva pyöreä putki menee kylkeen tehtävän reiän läpi ja hitsataan päästään kiinni ennen päätylevyn asentamista (hitsataan vain osittain tilarajoituksen takia) ja vielä läpimenokohdasta niin kuin ennenkin. Tällaisella rakenteella seinän lommahdus tai läpileikkautuminen ovat paljon epätodennäköisempiä. Kuva 27 havainnollistaa suunniteltua muutosta.



Kuva 27: Tehdyt muutokset rasitettuun alapaarteeseen

Muutosten jälkeen jännitykset alenevat murto-osaan alkuperäisestä ja rakenne kestää paljon paremmin maksimikuormituksen. Kuvasta 28 nähdään uudet tulokset. Suurin jännitys 5132 MPa johtuu automaattiverkottajan ongelmista ja voidaan jättää huomioimatta. Muuten varmuutta näyttäisi jäävän myötörajaan 355 MPa nähden yli 3, mikä on erittäin hyvä hieman epävarmaa rakennetta mitoitettaessa.



Kuva 28: Rasitetun alapaarteen jännitykset muutosten jälkeen

8.2.5 Monella tapaa kuormitetun palkin tarkastelu

Rakenteeseen muodostuu useita kohtia, joissa vaikuttaa monia kuormia samanaikaisesti, kuten normaalivoimia, taivutusta ja vääntöä. Tällaisessa tilanteessa on oleellista tarkastella näiden voimien yhteisvaikutusta palkkiin ja varmistua ettei jännitykset ylitä sallittuja raja-arvoja. Vetokokeessa materiaaleille saatu myötöraja ei suoraan kerro materiaalin kestosta moniakselisessa jännitystilassa. Siksi lujuusopissa on käytössä erilaisia lujuushypoteeseja erilaisille materiaaleille. Teräs luetaan sitkeäksi materiaaliksi ja yleisimmin käytetään von Mises myötöehtoa. (Lujuusoppi, Tapio Salminen, Sami pajunen)

Tarkasteltavaksi rakenteessa valittiin keskirungon kiinnityspäädyn pystypalkki. Siihen muodostuu lujuuslaskentaohjelman mukaan normaalivoimaa n. 2950 N taivutusta 2360 Nm ja vääntöä 1244 Nm. Tarkka lasku on liitteenä 4. Lasku suoritettiin von Mises vertailujännitystä käyttäen ja vertaamalla sitä myötörajaan.

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\delta_x - \delta_y)^2 + (\delta_y - \delta_z)^2 + (\delta_z - \delta_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]} \quad (36)$$

Laskun tuloksena selvisi varmuusluvun olevan n. 5. Samalla tavalla voitaisiin laskea kaikki palkit, mutta siihen ei ole tarvetta kun tiedetään rasitetuimman palkin kestävän.

8.2.6 Ristikoputken nurjahdustarkastelu

Ristikkoa suunnitellessa oli hyvä tarkastella myös putkia nurjahduksen varalta. Yleisimmin nurjahdustarkastelussa käytetään yksinkertaistettua Eulerin nurjahduskaavoja. Eulerin nurjahdustapaukset eivät suoraan kuvaa todellista tilannetta ristikossa, mutta tarkasteltaessa pääakselin alapuolella olevaa paneelirunkojen väliputkea käytettiin nurjahdustapausta 3. Tapauksessa käytettiin kaavaa 37

$$P_n = \frac{\pi^2 EI}{L_n^2} \quad , \quad (37)$$

missä E on kimmokerroin, I taivutusneliömomentti ja L_n valitun nurjahdustapauksen mukainen nurjahduspituus. Lasku on esitetty liitteessä 5 ja tulokseksi saatiin nurjahduksen suhteen varmuusluvuksi 15,3. Varmuutta tarkasteltiin myös kaavan 36 mukaan ja saatiin varmuudeksi 3,87.

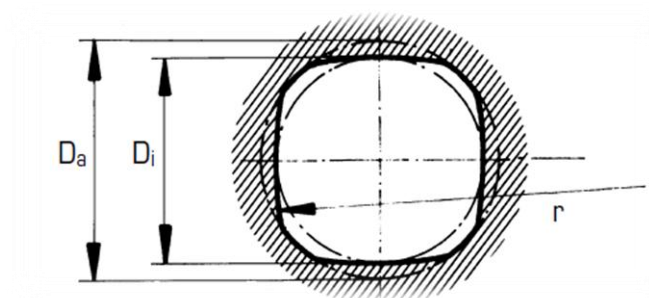
9 PÄÄAKSELI

Pääakseli yhdistää paneelirunkojen puoliskot toisiinsa ja kannattelee koko rakennetta. Akselin tulee kestää kaikki kuormat mitä rakenteelle voi muodostua, joten sen suunnittelussa huomioitiin suurimmat kuormitukset erityisen tarkasti. Pääakselin yhteydessä suunniteltiin laakerointi akselille ja paneelien kulman kääntöä silmällä pitäen lukituslevy.

9.1 Pääakselin suunnittelu

Paneelirunkojen kiinnitys pääakseliin oli keskeinen suunnittelua dominoiva osa. Mikäli akseli vain hitsattaisiin kasaan, niin menetettäisiin kaikki edut mitä kokoonpantavilla osilla saavutettaisiin. Erillisillä osilla saataisiin helpompi kokoonpano vaihe, huollon mahdollisuus ja mahdollisuus muunnella tai purkaa rakenne hallitusti. Rakennetta suunniteltiin pulttiliitoksella kokoonpantavaksi.

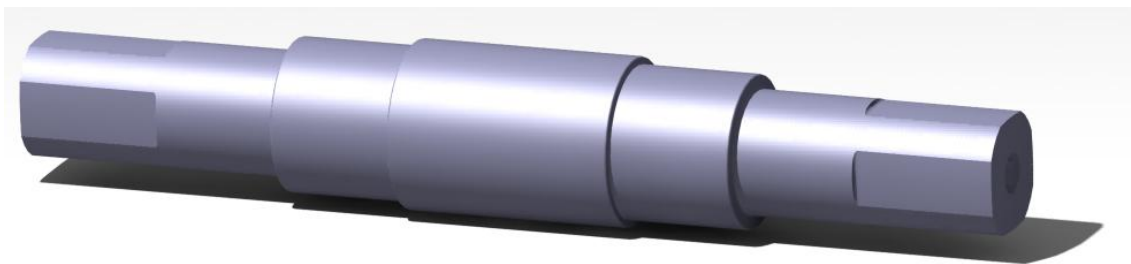
Akselin yhdistäminen paneelirunkoihin päätettiin toteuttaa laippaliitoksena. Laippojen tosin pitäisi olla irrotettavia, jotta pääakselille saataisiin asennettua laakeri ja ketjupyörä. Laippaosan ja akselin liitoksen tulisi siirtää suuria momentteja, joten yhdistämistavaksi valittiin muotosulkeinen liitos. Muodoksi valittiin kohtalaisen helposti akseliin ja napaan työstettävissä oleva standardin DIN 31712 mukainen P4C-profiili, mikä nähdään kuvassa 29.



Kuva 29: P4C-profiilin havainnekuva

Laakerointiin ajateltiin käytettävän liukulaakereita niiden kestävyys ja edullisuuden takia. Laakereiden ei tarvitse kestää juuri minkäänlaisia pyörimisnopeuksia, vaan enemmän suuria voimia. Laakeroinnissa päädyttiin rullattuun pronssilaakeriin, koska ne kestävät kovia kuormia, toimivat likaisissa olosuhteissa ja niillä on hyvät voiteluominaisuudet. (<http://www.detrading.fi/fi/tuotteet/liukulaakerit/rullattu-Pronssi/WF-WB802>).

Akseli suunniteltiin kuvassa 30 mukaiseksi. Akselissa käytetään hieman tavallista kestävämpää S420 teräslaatua suurten kuormitusten takia. Liitteessä 14 on esitetty tarkat mitat työpiirustuksessa.



Kuva 30: Ylärunkorakenteet yhdistävä pääakseli

9.1.1 Pääakselin lujuuslaskenta

Pääakselin lujuustarkastelussa haettiin kokeilemalla sopivat mitat siten, että akseli kestää taivutusmomentin vaikutukset. Lisäksi tarkasteltiin sopivat mitat akselin ja laipan liitokselle, valittiin sopivan kokoinen laakeri ja tarkasteltiin ketjupyörien liitoshitseille sopiva a-mitta. Näiden kaikkien lopputuloksena syntyi pääakseli kaikkine mittoineen.

Akselin ja laipan välinen profiili määriteltiin saman kokoiseksi, kuin laakeripinnan halkaisija. Mitään syytä ei ollut tehdä pienempääkään. Momentinsiirtokyky kyseiselle liitokselle on kaavan 38 suuruinen. (DIN 32712)

$$M_t = L \cdot p_{sall} \left(\pi \cdot d_r \cdot e_r + \frac{d_r^2}{20} \right) \quad (38)$$

Kaavassa L on liitospinnan pituus, p_{sall} on muotosulkeisen liitoksen sallittu pintapaine, d_r on akselin laskennallinen halkaisija ja e_r on akselin epäkeskeisyysmitta. Laskemalla tulos lopullisilla mitoilla saadaan liitospinnan momentinsiirtokyvyksi $M_t = 6,613 \text{ kNm}$. Siirtokyky riittää hyvin rakenteen kuormituksiin nähden.

Laakeria tarkasteltaessa taivutus- ja vääntömitoitusten jälkeen laakerin halkaisijaan ei voida vaikuttaa. Laakerikuormitus laskettiin kuitenkin kyseisille laakereille. Liukulaakerin pintapaineen arvo voidaan yksinkertaisesti laskea kavalla 39. (<http://www.detrading.fi/fi/teoria/kuormitus>)

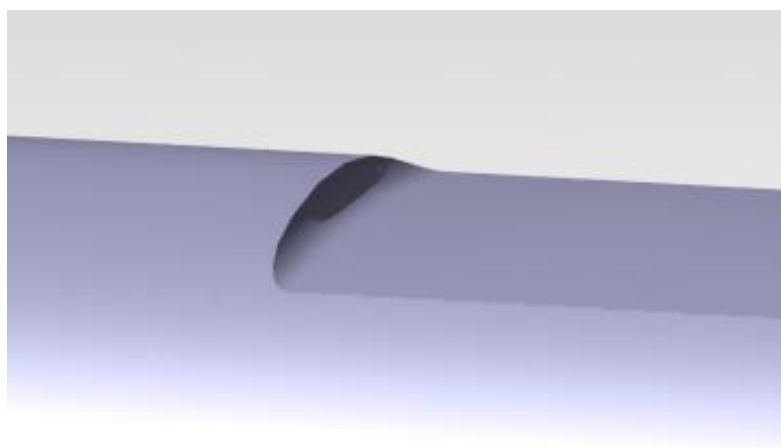
$$p = \frac{F}{b \cdot d} \quad (39)$$

Kaavassa 39 F on kuormittavan voiman suuruus, b on laakerin pituus ja d on laakeripinnan halkaisija. Liitteessä 3 on lasku esitettynä. Valitun laakerin halkaisija on 65 mm ja pituus 60 mm, joten pintapaineelle saadaan tulos $p = 5,128$ MPa. Valmistajan ilmoittama sallittu kuormitus kyseiselle laakerille on esitetty taulukosta 1. Sallitut kuormitukset ovat laskettuja arvoja huomattavasti suuremmat ja laakerit varmasti kestävätkin kuormituksen. (http://www.detrading.fi/files/produkter/WF-WB802/pdf/WB802_FIN.pdf)

Taulukko 1: Laakerivalmistajan ilmoittamat maksimikuormitukset eri liukunopeuksille

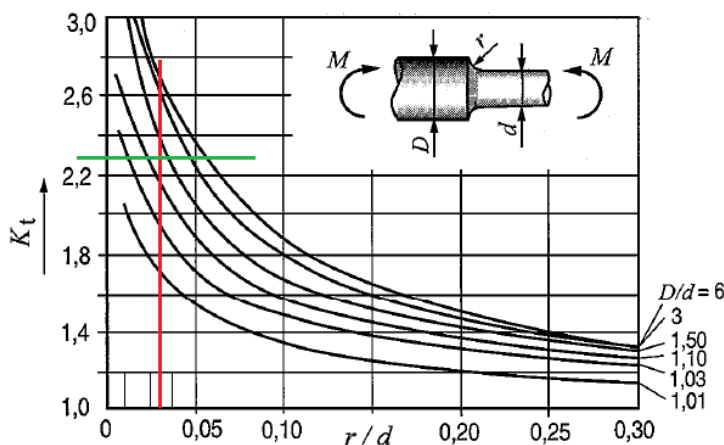
Kuormitus, Mpa	Nopeus, m/s
n. 280	0
80-120	0,01
30-40	2

Taivutusjännityksen arvoa määriteltäessä lähtökohtana olivat lujuuslaskentamallin tulokset ylärungosta. Mallissa pääakselin keskelle muodostuu 4158 Nm taivutus ja laipan kiinnityskohdalle 1560 Nm taivutus. Laskuja on tarkemmin liitteessä 3. Pääakseli on hyvin paksu keskiosasta ja siihen muodostui vain n. 62 MPa jännitys. Suurempi jännitys muodostuu laipan ja akselin liitoskohtaan, mikä nähdään kuvassa 31.



Kuva 31: Pääakselille muodostuva epäjatkuvuuskohta

Liitoskohtaan muodostuu väistämättä lovi, missä jännitykset ovat tavallisia alueita korkeammalla. Huippujännitys lovessa laskettiin käyttämällä kuvasta 32 katsottua arvoa lovenmuotoluvulle K_f . Lovenmuotoluvun arvolla 2,28 saadaan jännitykseksi 132 MPa. Sen varmuus myötöön nähden on yli 3, mitä pidettiin tavoitearvona ja on siis hyväksyttävä tulos.



Kuva 32: Lovenvaikutusluvun käyrä kuvan mukaiselle akselille

Viimeisenä selvitettiin pääakseliin kiinnitettävien ketjupyörien kiinnityssauman a-mitta. Liitosta lähdettiin mitoittamaan tasalujaksi ketjupyörässä olevan ketjun kanssa. Levyketjupyörä on 10B Z=34, jakohalkaisija 172,05 mm ja standardin mukaisen rullaketjun murtolujuuden on 22,4 kN. Suurin momentti on tällöin 1926 Nm, jolloin hitsisaumaan vaikuttava voima on 43,7 kN sauman ollessa säteellä 44 mm akselin keskeltä. Pienahitsin yksinkertainen kestävyystarkastelu hoidetaan kaavalla 40. (Koneenosien suunnittelu. s.262)

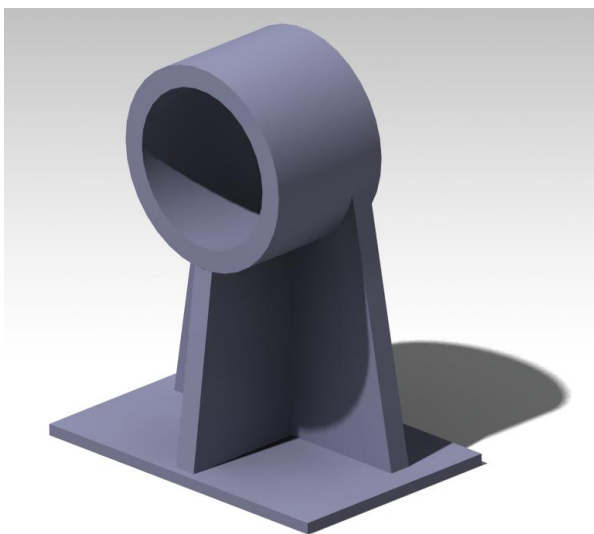
$$a = \frac{F}{f_{wd} \cdot l} \quad (40)$$

Kaavassa F on hitsiin vaikuttava voima, f_{wd} on hitsiaineen leikkauslujuus ja l on sauman pituus. Tarkempi lasku esitetty myös liitteessä 3. Pienahitsin a-mitaksi saatiin 0,684. Noin pientä mitta ei ole järkeä käyttää, joten päätetään valmistuksen kannalta sopivaksi työmitaksi $a = 4$ mm. Suuremmalla mitalla saumaa ei tarvitse vetää koko akselin kehälle, vaan tehdään osahitsi. Pienahitsiä suunniteltaessa riittävä lämmöntuonti on taattava hyvän sauman saamiseksi ja laskennallisen a-mitan kohdalla voitaisiin kohdata joitain ongelmia jos mitta ei suurenneta. (Koneenosien suunnittelu s.257)

9.2 Pääakselin laakeripesän suunnittelu

Laakeripesän piti olla itse tehtävissä ja helppo rakenteeltaan. Ostetut laakeripesät ovat kohtalaisen kalliita ja siksi niitä ei haluttu kokoonpanossa käyttää. Perusrakenteeltaan laakeripesässä päädyttiin hyvin nopeasti käyttämään paksuseinäisestä sorvattua putkea pesänä, joka on kiinni paksusta levystä koostuvaan runkoon. Rungon muoto mahdollistaa pienen taipuman mahdollisuuden, mikä liukulaakerikäytöissä on suositeltavaa. Laakeripesän kiinnitys ylätasoon tapahtuu pulttiliitoksena neljällä M12 pultilla. Laakeripesään suunniteltiin myös rasvanipat huoltamisen mahdollistamiseksi.

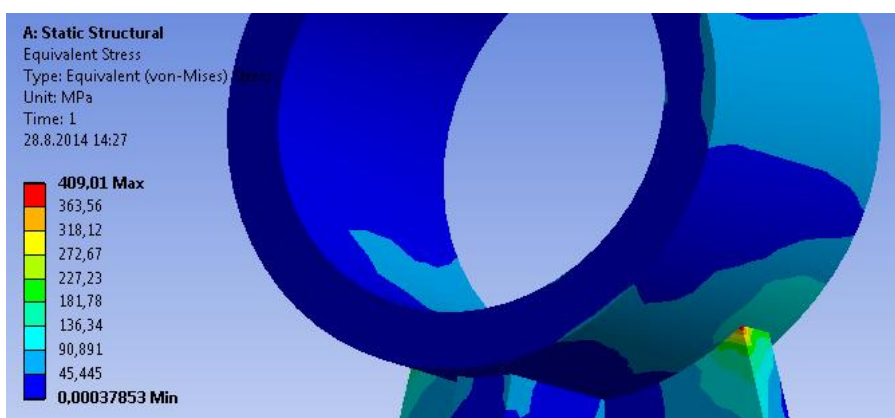
Nippoja on kaksi, jotta rasvaa saadaan tasaisemmin laakerikehälle, vaikka akselin liikerata on vain noin 90° . Lopputulos nähdään kuvasta 33.



Kuva 33: Pääakselin laakeripesä

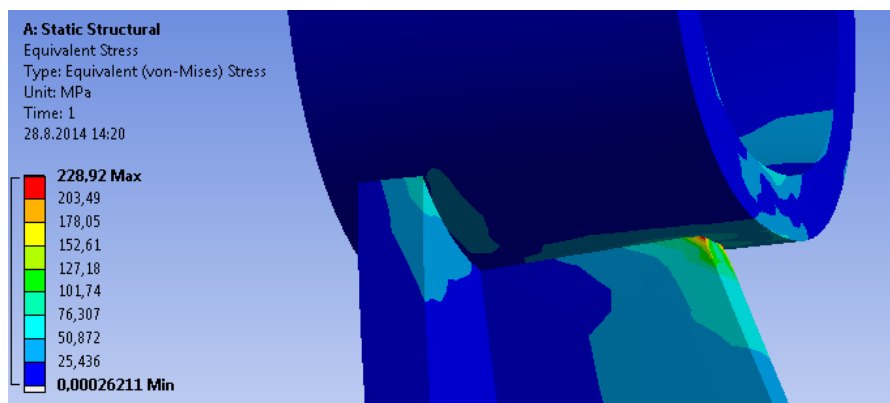
9.2.1 Laakeripesän lujuuslaskenta

Laakeripesän kesto laskettiin lujuuslaskentaohjelmaa käyttäen. Rakennetta tarkasteltiin kahdessa ääriarvotapauksessa. Tarkastelutapaukset olivat suurin mahdollinen lumikuormitus ja suurin mahdollinen tuulikuormitus. Lopullisen rakenteen tuloksia vertailtiin myös suuntaa antavien käsinlaskentatulosten kanssa. Alkuperäisen rakenteen kanssa oli suuria ongelmia hyvin korkeiden jännityshuippujen syntymisen kanssa. Todennäköisesti kuvien 34 ja 35 kaltaiset jännityshuiput ovat paljon alhaisempia, mutta varmuuden vuoksi rakennetta muotoiltiin kuvan 36 tavoin paremmaksi.



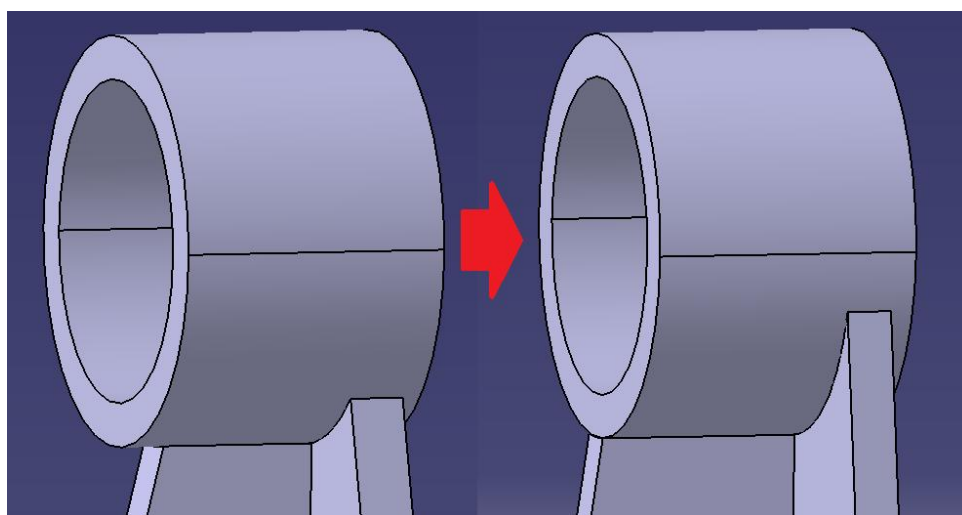
Kuva 34: Laakeripesälle muodostuvien huippujännitysten paikka tuulikuormituksessa

Tuulikuormitus laskentamallissa asetettiin 7500 N suuruiseksi vaakavoimaksi laakeripesän sisäkehälle leveyssuunnassa olevalle suoralle. Elementtiverkkoa tihennettiin suurimman kuormituksen alaisena olevan nurkan alueelta. Tuenta oli kiinteänä tuentana laakeripesän kiinnityslevyn alapinnalla.



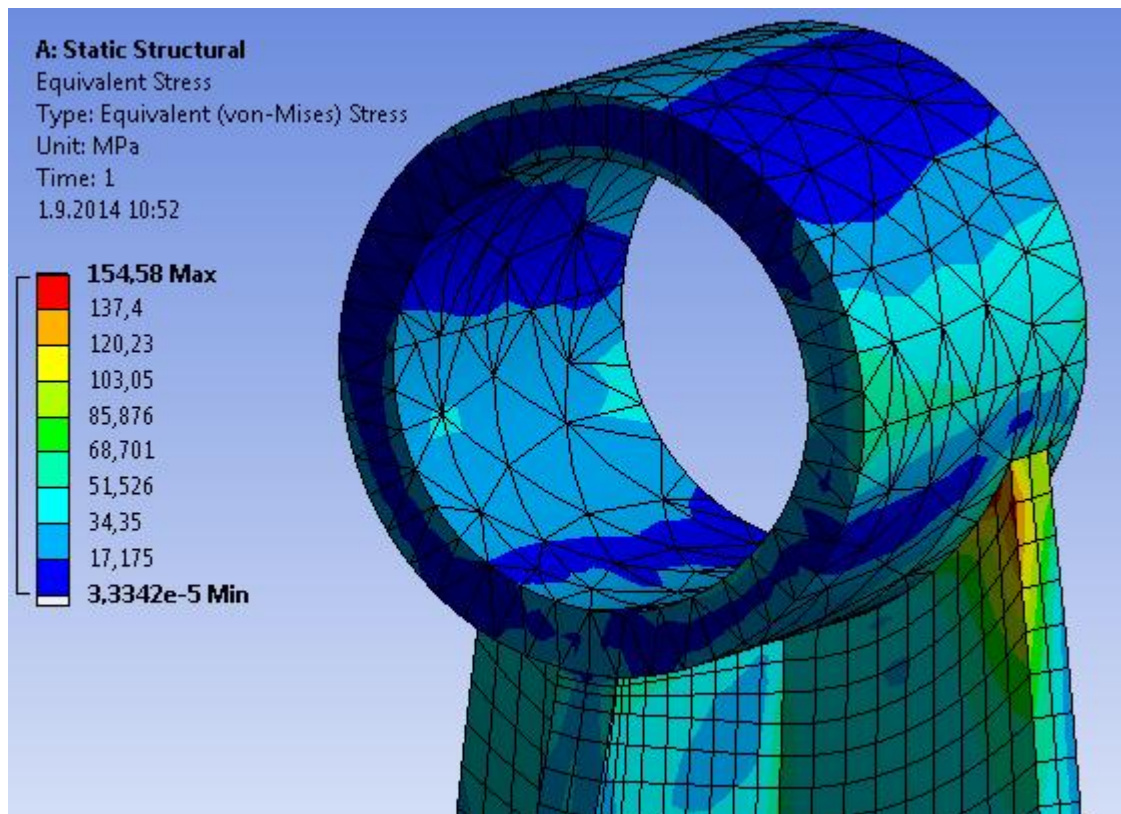
Kuva 35: Laakeripesälle muodostuvan huippujännityksen paikka lumikuormituksessa

Suurimman lumikuormituksen kestoä määriteltäessä tuenta oli sama kuin tuulikuormituksessa. Elementtiverkkona käytettiin vakioverkkoa tihennettynä suurimman kuormituksen alaisena olevan kulman alueelta. Kuormitus asetettiin laakeripesän sisäkehän puolikkaalle alaspäin 20 kN voimalla. Kuormitustapa poikkeaa hieman oikeasta ja aiheuttaa joitain väärin tulkittavissa olevia tuloksia, mutta tiedostamalla tämän voidaan tuloksia tulkita paremmin.

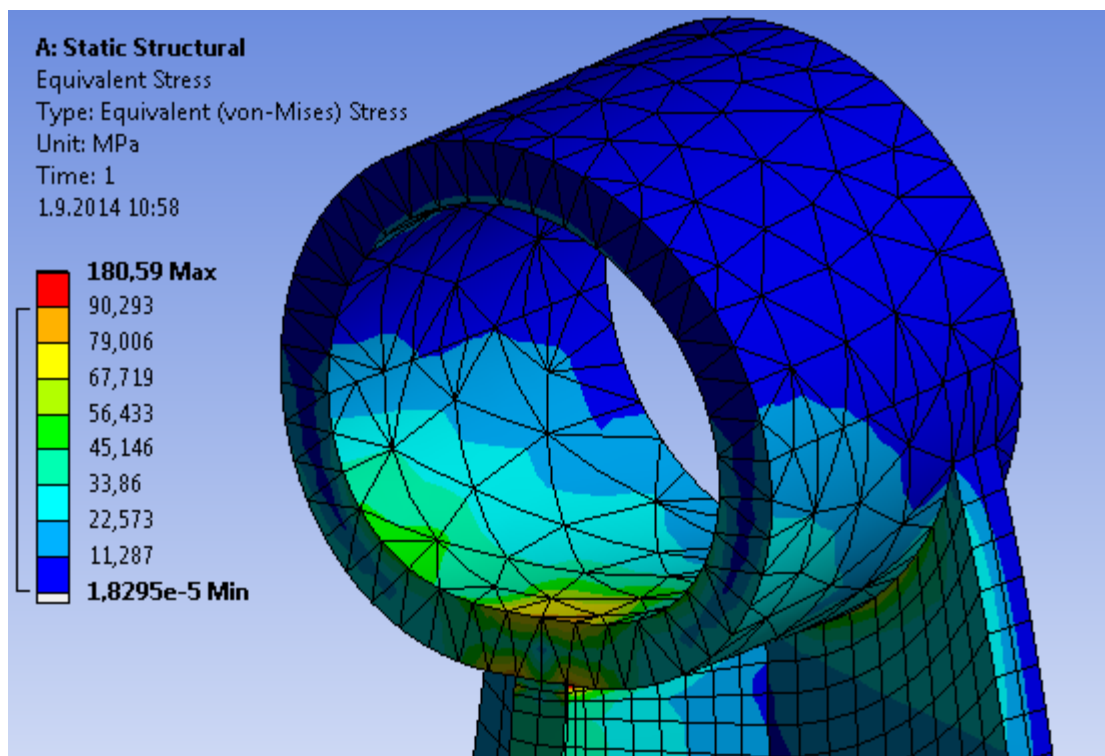


Kuva 36: Alustavien lujuuslaskujen jälkeen tehdyt muutokset laakeripesän rakenteeseen

Muutoksena rakenteeseen suurennettiin runkorakenteen levyjen kosketusala laakeripesän kanssa. Muutosten jälkeen rakenteen jännitykset alenivat paljon ja voidaankin todeta, että nykyisenkaltainen laakeripesä kestää kaikki sille asetetut kuormitukset. Kuormituksia vastaavat tulokset nähdään kuvista 37 ja 38.



Kuva 37: Lopullisen laakeripesän vertailujännitys tuulikuormituksessa

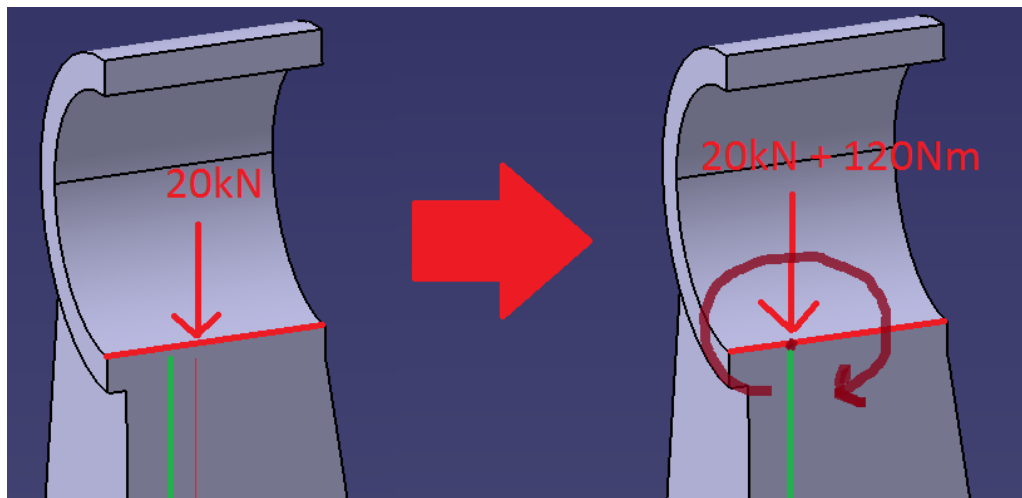


Kuva 38: Lopullisen laakeripesän vertailujännitys lumikuormituksessa

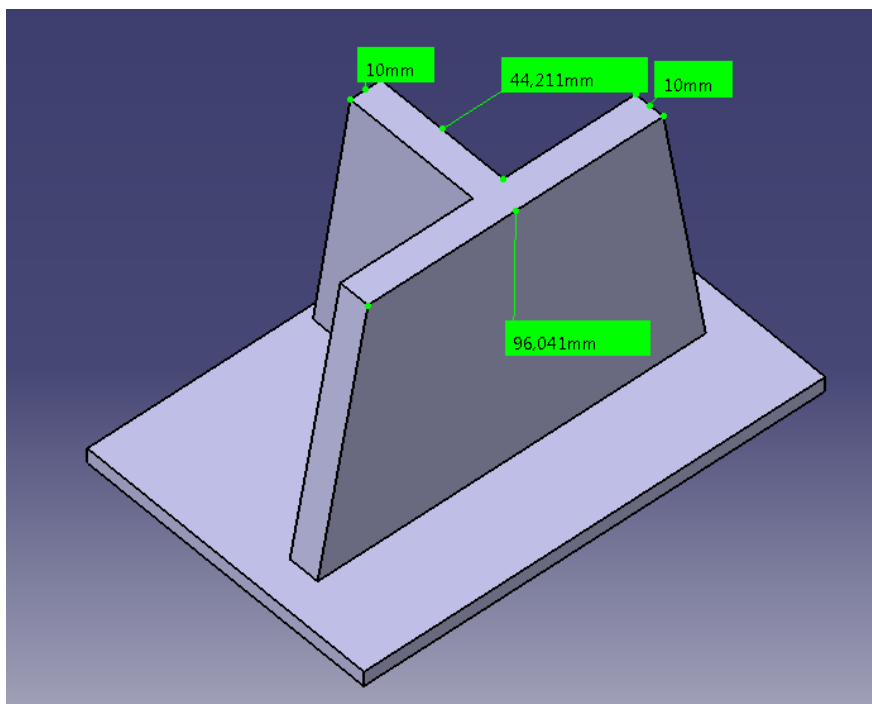
Uudet tulokset antavat suuntaa antavina tuloksia hyvän varmuuden myötörajaan nähden. Varmuus on 2-2,5 välillä, jolloin voidaan rakenteessa olevan varmuutta sen verran, että yllättävät kuormitukset eivät johda rakenteen rikkoutumiseen.

9.2.2 Lumikuormituksen käsinlaskenta

Käsinlaskennassa keskityttiin levyrakenteesta koostuvan runko-osan suuntaa antavien jännitysten laskemiseen. Laskut tehtiin huomioimatta laakeripesän vaikutusta rakenteeseen. Kuormituksena oli laakeripinnalle asetettu 20 kN voima alspäin. Laakeripinnalle asetettu voima ei vaikuta kuitenkaan tason painopisteen kohdalla. Laskennallisesti se pitää siihen siirtää, jolloin toimittiin kuvan 39 tavalla. Taivutusmomentin suuruus on voiman suurus kerrottuna epäkeskeisyydellä.



Kuva 39: Laakeripesän käsinlaskentaa havainnollistava kuva



Kuva 40: Käsin lasketun tason mitat

Rungon mitat tarkasteltavassa kohdassa nähdään kuvassa 40. Pintakeiön sijainti tasolle laskettiin kaavalla 41, missä S_{zi} on tasoalueen staattinen momentti. Se lasketaan kertomalla tasoalueen pinta-ala sen pintakeskiön etäisyydellä sovitusta nollatasosta.

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n S_{zi}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (41)$$

Taivutusmomentin jännitysten selvittämiseksi laskettiin poikkipinnan taivutusneliömomentti. Se laskettiin Steinerin lauseella vähentämällä koko muodon rajaamasta suorakaiteesta kaksi kulmiin jäävää suorakaidetta pois.

$$I = I_0 - A \cdot c^2 \quad (42)$$

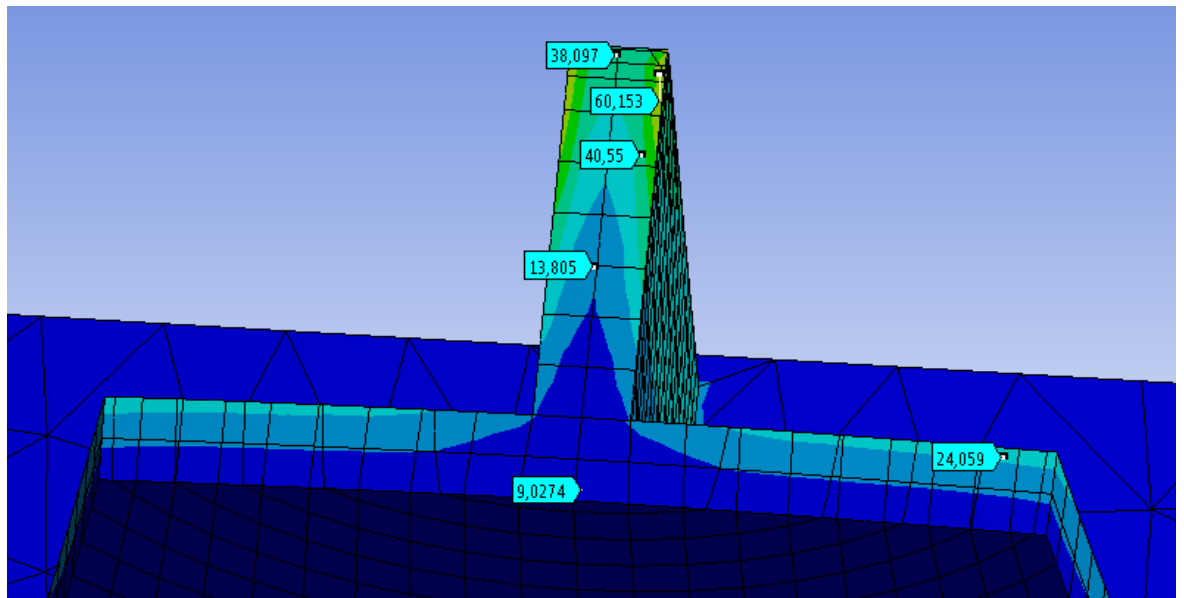
Kaavassa I_0 on tasoalueen pintakeskiön suhteen laskettu neliömomentti. A on saman tasoalueen pinta-ala ja c on tasoalueen painopisteen etäisyys laskettavan tasopinnan painopisteestä.

Koska poikkipinta ei ole symmetrinen se taipuu epäkeskeisesti, jolloin tason ylä- ja alapinnalle muodostuu eri taivutusjännitys. Taivutusvastus lasketaan jakamalla taivutusneliömomentti tarkasteltavan reunan etäisyydellä pintakeskiöstä.

Tarkemmat laskut on esitetty liitteenä 6. Tuloksena saatiin normaalijännityksen arvoksi 14,3 MPa, tason yläpinnan taivutusjännitykseksi 19 MPa ja alapinnan taivutusjännitykseksi -6,3 MPa. Yhteenlaskettuna jännitys yläpinnalla on 33,3 MPa ja alapinnalla 7,9 MPa.

9.2.3 Laskentatulosten vertailu

Käsinlaskennan tuloksia vertailtiin kuvassa 41 esitettyihin tuloksiin. FEM-mallissa on näkyvissä laakeripesän litistymisen seurauksena muodostuvien jännitysten vaikutus levyn reunoille. Oikeastihan laakerikuorma jakautuu noin 110° alueelle tietokonemalliin asetetun 180° sijaan ja laakeripesä ei voi puristua kasaan koska, siellä on akseli sisällä. Levyn keskipintaa tarkastellessa saadaan kuitenkin hyvin samankaltaisia tuloksia keskeltä levyä mitattuna. Yläpinnan käsinlaskettu tulos oli 33,3 MPa ja tietokonemallin 38 MPa ero on siis noin 15 %. Alapinnan käsinlaskettu tulos 7,9 MPa eroaa tietokonemallin 9 MPa tuloksesta noin 14 %. Tuloksia voidaan mielestäni pitää erittäin hyvinä ja todeta laskentamallin tulokset luotettaviksi ja laakeripesän kestäväen kuormitukset hyvin.



Kuva 41: Käsinlaskentaa vastaavan tason jännitysjaakauma lujuuslaskentamallissa

10 AURINKOPANEELIEN KIINNITYS KEHIKKO

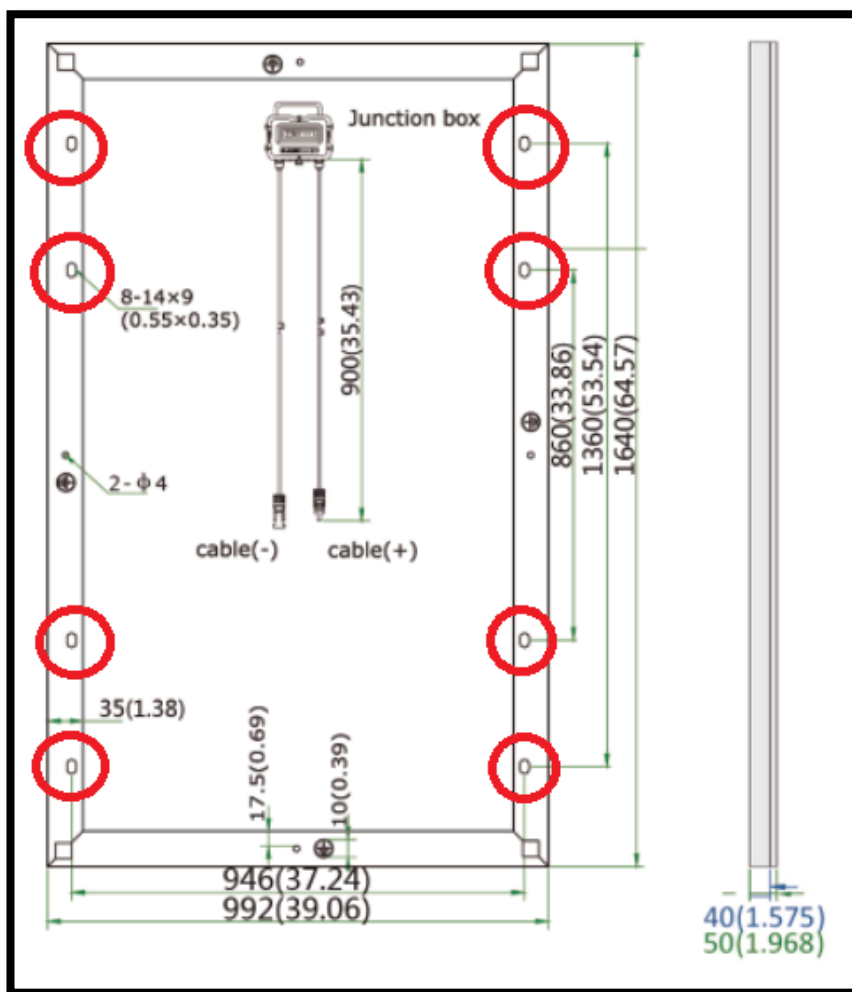
Projektin määrittelyssä oli annettu ehtona mahdollisuus kiinnittää erin kokoisia aurinkopaneeleita runkoon. Lisäksi lähes kaikkien paneelivalmistajien asennusohjeessa kielletään paneelien asentaminen runkoon, mikä aiheuttaa taivutusta paneeliin. Lasipinnoite ei tietenkään kestä tällaista, mutta runkoon joka tapauksessa tulee muodostumaan taipumia ja muodonmuutoksia. Suora kiinnitys runkoon ei siis onnistunut, joten suorakiinnityksen sijaan suunniteltiin ns. kelkka mikä tukee paneelia, mutta on itse hieman joustavasti kiinni päärungossa. Kelkka mahdollistaa myös helpon tavan asentaa erin kokoisia paneeleita runkoon.

10.1 Aurinkopaneelien kiinnitys

Aurinkopaneelit kiinnitetään yleensä valmistajan kiskoon kiinnitys tarkoituksenmukaisella kiinnityshakasella. Hakasen käyttö vaatii kuitenkin monesti oikeanlaisen kiskon ja oikeat hakaset, joten rakenteessa niiden käyttöä ei voitu edes harkita. Kaikkien yleisimpien valmistajien paneelirungossa on kuitenkin myös pulttikiinnityksen mahdollistavat reiät. Kuva 42 selventää paneelin takana olevien reikien sijaintia. Muunneltavuuden kannalta päädyttiin niiden käyttämiseen. Ongelmana on kuitenkin taulukosta 2 ilmenevä yhteensopimattomuus reikien paikan suhteen. Mitoilla ei ilmeisesti ole mitään standardia ja mittoja on lähes yhtä monta kuin valmistajiakin. Jonkinlaiseen ryppääseen reiät kuitenkin sijoittuvat ja kelkan kiinnitys reikien korvaaminen pitkällä rei'illä mahdollistaa monien eri valmistajien paneelien kiinnityksen.

Taulukko 2: Erilaisten paneelien ulkomitat, sekä kiinnitysreikien paikkamittoja

paneelin valmistaja	leveys	korkeus	paksuus	reikien etäisyys 1	reikien etäisyys 2
schutten solar	992	1956	50/40	1056	1556
hyundai	983	1645	35	800	1100
sunmodule	951	1675	31	1099	1461
canadian solar	982	1638	40	1155	1588
kyocera	990	1662	46	1100	-
panasonic	798	1580	35	920	-
LG	1000	1640	35	900	1100
ET solar	992	1640	40	860	1360
lightway	990	1650	40/50	1020	-



Kuva 42: Aurinkopaneelin kiinnitysreikien sijainti

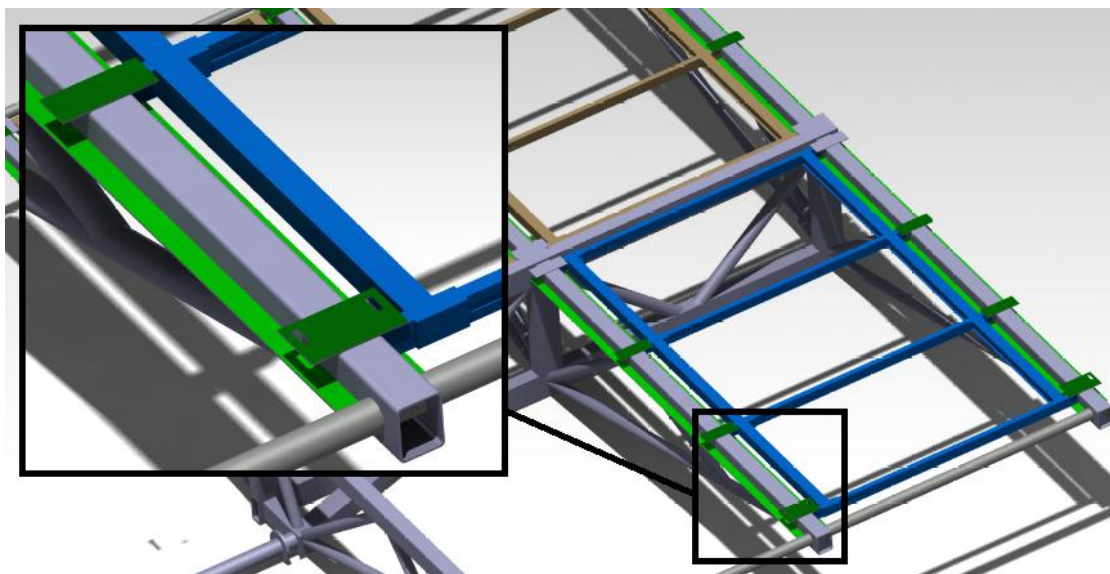
10.2 Kelkan suunnittelu

Kelkan suunnittelussa keskeisiä ominaisuuksia rakenteelle olivat: kevyt rakenne, helppo valmistettavuus, paneelikoon säädeltävyys ja helppo paikalleen asentaminen. Mielestäni näihin tavoitteisiin päästiin valmiin rakenteen kohdalla.

Valmistettavuuden kannalta rakenteella päästiin helpolla. Perustyöstömenetelmillä saadaan rakenne aikaiseksi, jolloin konekannalle ei aseteta suuriakaan vaatimuksia.

Paneelikoon säädeltävyydessä onnistuttiin hyvin. Rakenteen toisen puolen pitkittäiset ovat siirrettäviä pulttiliitoksia. Säädettävyydsvara on riittävä suurimpaan osaan eri valmistajien alle 1800 mm x 1000 mm paneeleista. Samoin kiinnitysreikiä varten tehtävät reiät toteutetaan, joko pitkien reikien avulla tai poraamalla aina uudet reiät kohdistetun paneelivalinnan jälkeen. Valinta riippuu tilaajan mielipiteestä ja siitä tullaanko todellisuudessa paneeleita vaihtamaan juuri koskaan.

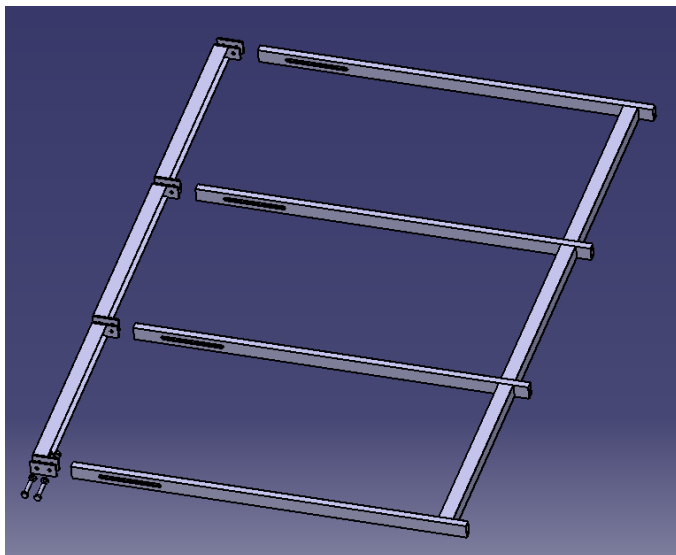
Paikalleen asennettavuuden piti olla helppoa, sillä 6 metrin korkeudessa ei haluttu kovin monimutkaisiin asennustöihin ryhtyä. Parhaimmaksi vaihtoehdoksi valittiin kelkan työntäminen jonkinlaisiin kiskoihin, mitkä pitävät rakennelman paikallaan. U-profiilista tehty kisko olisi ollut kaikkein helpoin ratkaisu, mutta painoa ja hintaa kiertyi sillä ratkaisulla liian paljon. Kiskot toteutettiin lopulta hitsauttamalla lattatangot paneelirunkojen sivutukiin, mistä muodostuu kelkan paikallaan pitävä rakenne. Kisko suunniteltiin hieman väljäksi, jotta paneelirungon kuormituksen aikaiset muodonmuutokset eivät heti aiheuta vääntöä myös kelkan kautta itse paneeleihin.



Kuva 43: Kelkan kiinnitystä havainnollistava kuva

Kuvassa 43 nähdään kiskon rakenne. Alapuolella on yhtäjaksoinen lattatanko kiskona ja yläpuolella vain kelkan vaakapalkkien yläpuolella liuska pitämässä kelkkaa paikoillaan. Lukitus tapahtuu työntämällä kisko paikoilleen ja asettamalla päädyssä olevaan uloimpaa yläpuoliseen tukeen pulttiliitoskiinnitteinen paikallaanpidin.

Kevyttä rakennetta suunniteltaessa saavutettiin rakenteelle noin 16,5 kg paino kelkkaa kohden. Yhteispainoksi näin ollen muodostuu 134 kg. Materiaalina olisi toki voinut käyttää myös alumiinia mikä painaa noin kolmanneksen vähemmän, mutta putkiprofiilien kokoa olisi todennäköisesti jouduttu suurentamaan. Alkuperäisen materiaalivalinnan mukaan päätetään käyttää S355 terästä. Lopullinen rakenne kelkalle nähdään kuvassa 44.



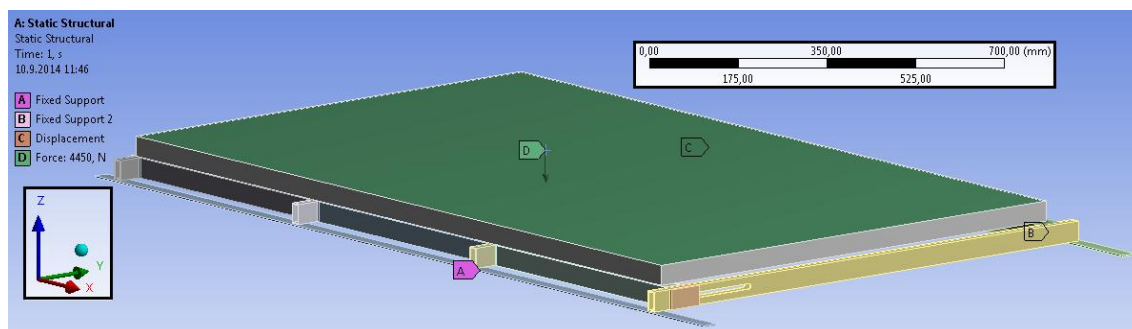
Kuva 44: Suunnitellun kelkan kokoonpanokuva

10.3 Kelkan lujuuslaskenta

Kelkan lujuustarkastelussa pyrittiin löytämään mahdollisimman kevyt putkiprofiili rakenteelle. Suurimman kuorman kantavat suunnitellussa rakenteessa vaakapalkit. Ne mitoitettiin käyttämällä kahdesta päästä kiinteästi tuetun palkin kaavoja liitteessä 7 esitetyllä tavalla. Laskelmissa päädyttiin valitsemaan vaakaprofiiliksi RHS 40x20x2. Kyseisellä valinnalla jännitystaso tuen päissä on noin 75 MPa ja taipuma palkin keskellä 0,86 mm.

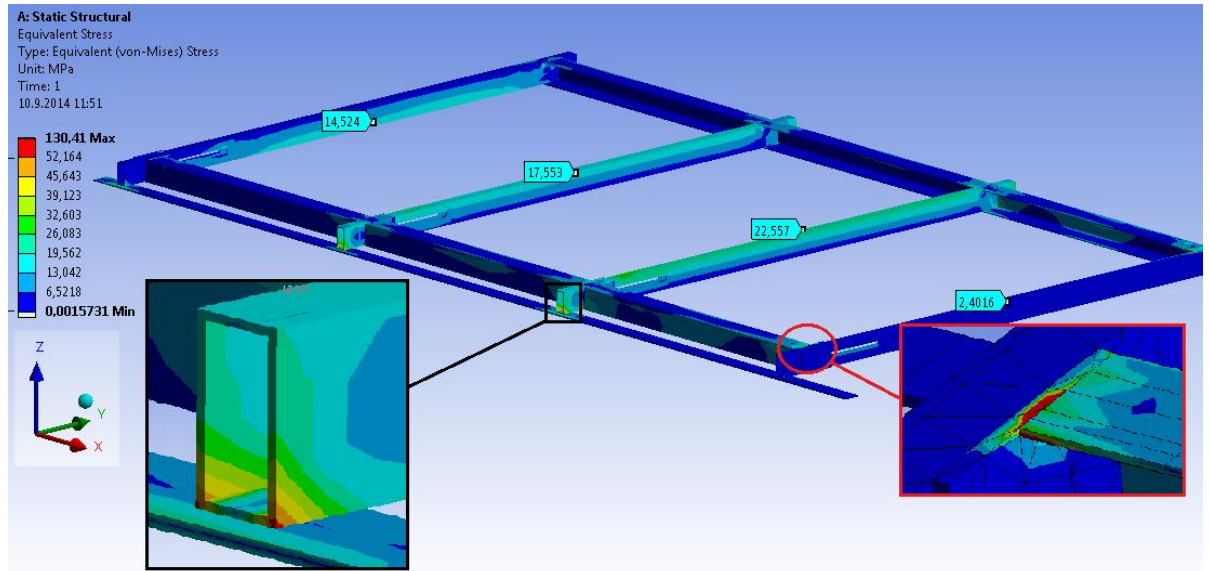
Pituussuuntaiset U-profiilit valittiin vastaamaan korkeussuunnassa vaakapalkkien korkeutta. Seinämävahvuuden olleessa myös 2 mm valikoitui profiiliksi C-profiili 40x40x2. Kiinteästi tuettuna molemmista päistä jännitystasoksi tuli 11,3 MPa.

Laskenta suoritettiin myös Ansys-ohjelmalla tekemällä kelkasta kuvassa 45 näkyvä lujuuslaskentamalli. Paneelien päälle asetettiin lumikuormitus 4450 N paneelia kohden. Paneeli on tuettu kiinteästi tuettujen pitkittäisliuskojen päälle, kuten suunnitellussa rakenteessa. Lisäksi paneelin liike rajoitettiin X-suunnassa.



Kuva 45: Kelkan lujuuslaskentamallin kuormitukset ja tuennat

Laskentamallin tuloksena saatiin kuvan 46 kaltainen jännitys jakauma. Jännitykset vaakapalkkien päissä on noin 60 MPa. Suurin jännitys muodostuu C-profiilin yläpinnalle ja on noin 130 MPa. Myötörajaan on kuitenkin vielä varmuutta noin 3, joten rakenne hyväksytään sellaisenaan.



Kuva 46: Kelkan lujuuslaskentamallin vertailujännitysten tulokset

C-profiilin suurinta jännitystä ei alettu tukia kahdelta reunalta tuetun laatan mukaisesti, sillä laattateorian soveltaminen tilanteeseen olisi sen työläyden takia ollut resurssien tuhlausta. Varsinkin tilanteessa, missä laskentamallin tulos ei ole kovinkaan lähellä myötörajaa.

Käsinlaskennan ja tietokonemallin tulosten vertailu on esitetty taulukossa 3. Tulokset eroavat toisistaan suhteellisen paljon, mutta ottaen huomioon alhaisen jännitystason voidaan rakenteen olettaa kestävän sille asetetut kuormitukset.

Taulukko 3: Kelkan lujuuslaskennan tulosten vertailu

	FEM	käsinlasku	erotus	erotus %
Vaakatuen suurin jännitys, Mpa	60	74,35	-14,35	-19 %
Pitkittäistuen jännitys päissä, Mpa	16	11,34	4,66	41 %
Vaakatuen suurin siirtymä, mm	0,367	0,858	-0,491	-57 %
C-profiilin kuormitettu kohta, Mpa	130,4	-	-	-

11 KÄÄNTÖMEKANISMIT

Rakenteen tärkeimpiä tavoitteita oli mahdollistaa rakenteen kääntäminen eri ilmansuuntiin ja paneelien kulman muuttaminen. Keskeisenä ajatuksena oli pystyä seuraamaan aurinkoa mahdollisimman optimaalisella kulmalla aurinkopaneelien tuottavuuden kannalta. Mahdollisia kääntömekanismeja oli lukuisia erilaisia, mutta tässä työssä keskityttiin kehittämään mekanismit, mitkä voitaisiin valmistaa mahdollisesti itse.

11.1 Ilmansuunnan käännön vaihtoehdot

Suunnittelussa ajateltiin oletuksena ylätasoon olevan akseloitu pystyrungon keskelle. Lähtökohtaisesti alettiin miettiä miten siihen akseliin saadaan alhaalta käsin tuleva liike siirrettyä ylös pyörimiseksi. Eri vaihtoehtoja läpikäydessä saatiin taulukossa 4 esitetyt 4 erilaista ratkaisua aikaiseksi.

Taulukko 4: Ilmansuunnan kääntömekanismin suunnittelu

Mekanismi	Huollettavuus	Toteutettavuus	Toimivuus	Ulkonäkö	Arvosana
pitkä kääntövarsi ulkokautta	4	5	1	3	13
akselointi ulkokautta + hammaspyörä	3	3	5	3	14
akselointi ulkokautta + ketjupyörä	3	4	5	3	15
akselointi rungon sisälle + hammasvaihde	1	2	4	5	12

Pitkä kääntövarsi olisi yksinkertaisena rakenteena helppo huollettavuudeltaan ja jopa huoltovapaa. Toteutettavuudeltaan rakenne olisi hyvin yksinkertainen ja helppo. Ulkonäöllisesti kääntövarsi olisi neutraali vaihtoehto. Toimivuudeltaan jättää kuitenkin hyvin paljon toivomisen varaa. Ilman vaihdetta kääntämiseen tarvittavat voimat olisivat hyvin suuria ja jopa mahdoton saada paneeleita kääntymään. Varren pitäisi olla myös erittäin jäykkä, ettei käännettäessä 5 m varsi vääntyisi liikaa.

Toinen vaihtoehto on huollettavuudeltaan kohtalaisen helppo. Kaikki osat olisivat vaihdettavissa ja niihin pääsisi käsiksi koska rakenne on pystyrungon ulkopuolella. Toteutettavuudeltaan mahdollinen, mutta sisältää monta valmistettavaa osaa. Hammaspyöräkäyttö vaatii kuitenkin suurta tarkkuutta valmistuksessa mikä laskee hieman arvosanaa. Toimivuudeltaan takuulla hyvä ja vaihteen takia kevyt käyttää. Ulkonäöllisesti ei mitenkään erikoinen.

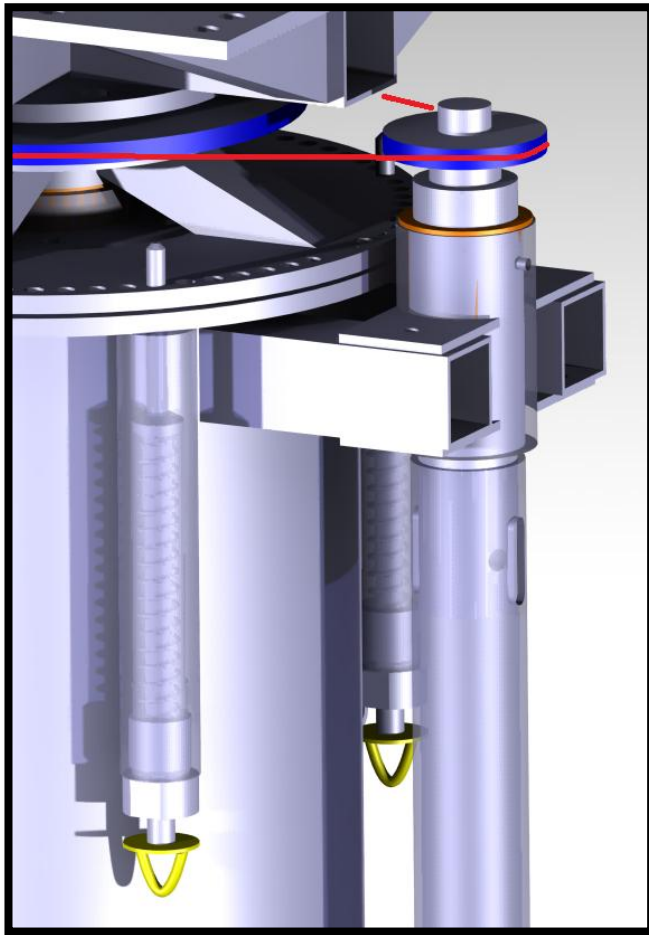
Kolmas vaihtoehto on muuten samanlainen kuin toinenkin, mutta on toteutettavuudeltaan hieman helpompi ja ehkä jopa hieman halvempi.

Neljännän vaihtoehdon kohdalla kynnyskysymykseksi muodostui rakenteen huollettavuus. Pystyrungon sisälle suunniteltaessa rakenteeseen olisi vaikea päästä käsiksi ja toteutettavuudeltaankin vähintään hankala. Toimivuudeltaan rakenne on varmasti hyvää tasoa. Ulkonäöllisesti olisi tosin kaikkein tyylikkään, mutta työssä painotetaan kuitenkin kestävyyttä ja tuotannollisia seikkoja.

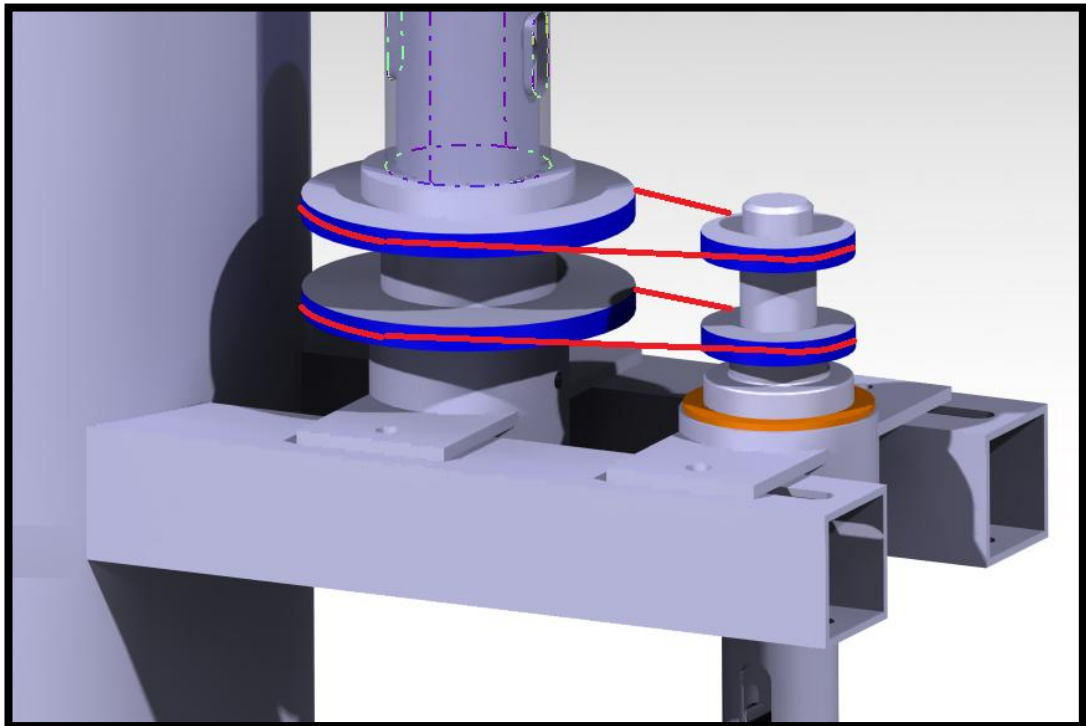
11.1.1 Ilmansuunnan käännön suunnittelu

Vaihtoehtoista taulukossa 4 parhaat pisteet sai vaihtoehto: ”akselointi ulkokautta + ketjupyörä”. Sitä lähdettiin siis suunnittelemaan eteenpäin. Lopputuloksena saatiin kuvissa 47, 48 ja 49 näkyvä mekanismi. Rakenteesta suunniteltiin akseliväliltään säädettävä, jotta ketjun ikääntyessä tapahtuva venyminen saadaan kompensoitua. Kaikissa laakeripesien kiinnityksissä on säätövaraa jonkin verran. Laakeripesät ovat kaikki liukulaakeroitu ja varustettu rasvanipalla. Pystyakselit ovat rakenneputkea mitkä kiinnitetään päissä oleviin sovitekappaleisiin. Kiinnitys tapahtuu pultiliitoksena. Akselien reiät ovat pitkulaisia, jotta hitsauskokoontenossa mahdollisesti olevat heitot olisi kompensoitavissa. Sovitekappaleissa on laakeripinnat liukulaakereita varten ja niihin kiinnitetään myös ketjupyörät. Kiinnitys tapahtuu hitsaamalla ketjupyörät sovitekappaleisiin.

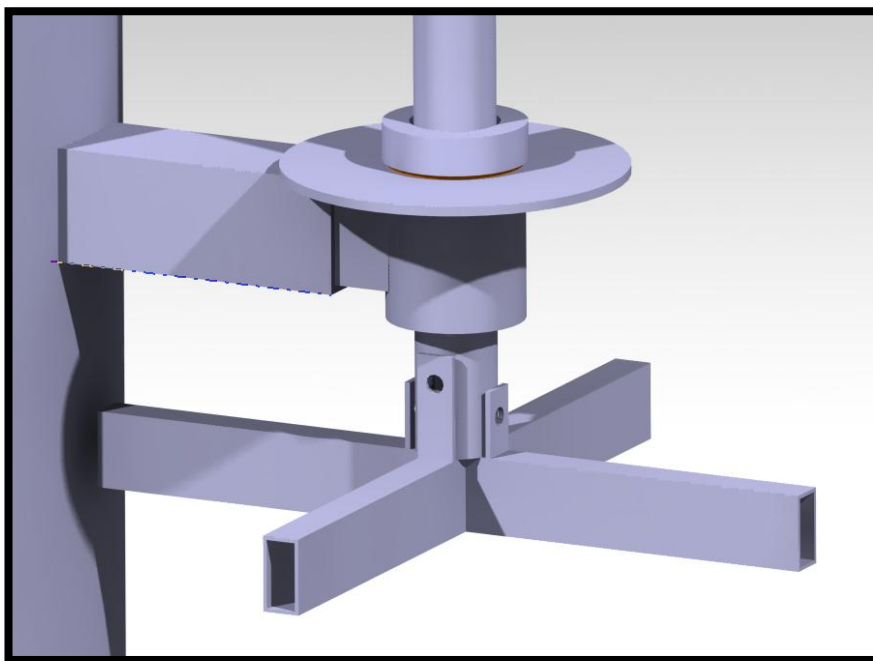
Rakenteeseen jouduttiin suunnittelemaan välivaihde, koska yläpään akseli ei saanut sijaita kovinkaan kaukana pystyrungon keskilinjasta tai muuten se olisi ottanut kiinni paneelirakenteisiin kulmaa käännettäessä. Siinä käytetään pienempää ketjupyöräkokoa, kuin ylhäällä ja siksi siinä on kaksinkertainen ketju. Välivaihde myös suurentaa välityssuhdetta ja mahdollistaa isomman halkaisijan pyöritys vipuun alhaalla.



Kuva 47: Ilmansuunnan kääntömekanismin yläpää



Kuva 48: Ilmansuunnan kääntömekanismin keskivaihe



Kuva 49: Ilmansuunnan kääntömekanismin alapää

Ilmansuunnan kääntö tapahtuu alapään pyörityskampea kääntämällä. Kuvassa 49 näkyvä pyörityskammen rakenne on vain suuntaa antava ja siihen voidaan helposti suunnitella ja kiinnittää parempi pyörityskampi. Laakeripesän yläosassa näkyvään pyöreään levyyn on tarkoitus asettaa kulman säätöä helpottava asteikko.

11.1.2 Ilmansuunnan käännön lujuuslaskenta

Kääntömekanismin lujuuslaskenta tehtiin käsin mitoittamalla pystyakselilla toimivat rakenneputket riittävän paksuiksi. Mitoitus suoritettiin silmälläpitäen tilannetta, missä liikkeen lukitus tapahtuisi alhaalla pyörityskammen lähellä. Mitoitus tapahtui siis voimansiirtomekanismin heikoimman osan eli ylhäällä olevan rullaketjun ehdoilla. Rakennetta lähdettiin mitoittamaan tasalujaksi ketjun kanssa.

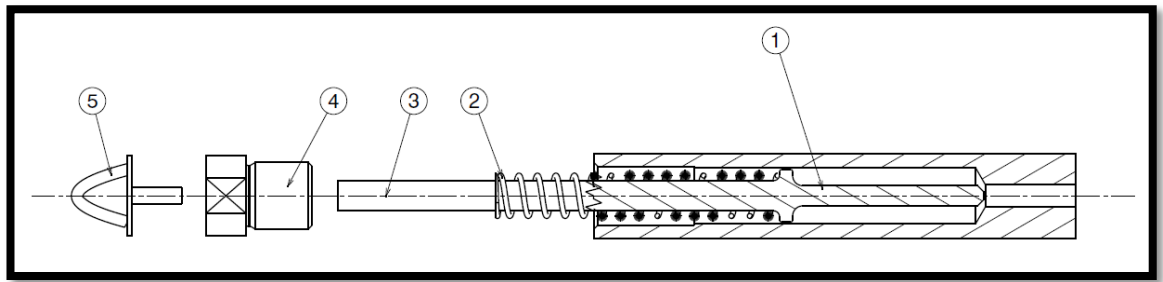
Voimansiirron ylemmän ja alemman akselin mitoituslaskut löytyvät liitteestä 8. Mitoitusarvona käytettiin yläketjun 60 kN murtolujuutta, mikä aiheuttaa yläakselille valitulle ketjupyöräparilla akselille vääntömomentin 2580 Nm. Välivaihteen kautta alemmalle akselille muodostuisi 1190 Nm vääntömomentti. Valituiksi profiileiksi valittiin jo aikaisemmin rakenteessa käytössä olevat CHS 60,3x4 ja CHS 42,4x3. Kustannustehokkuuden kannalta rakenteessa kannattaa käyttää mahdollisimman harvaa putkikokoa. Kyseisillä akseleilla yläakseliin syntyy 137,4 MPa:n ja ala-akseliin 173,9 MPa:n vääntöjännitykset.

Lisäksi liitteessä 8 on laskettu akselin päätyosien liitostapana käytettyjen pultiliitosten kiristysmomentti, ettei liitoksessa tapahdu luistoa. Tuloksena saatiin, että pultin pitää olla erikoispultti kovuusluokasta 10.9. Lisäksi pulttiin pitää saada kokoonpanovaiheessa noin 100 Nm kiristysmomentti, jotta haluttu ruuvivoima 42,8 kN saavutetaan.

11.2 Ilmansuunnan käännön lukitus

Toimivan lukitusmekanismin suunnittelu oli lähes yhtä tärkeää kuin itse mekanisminkin. Kulman oli pysyttävä sinä mikä sille oli asetettu tai ainakin paneelien tuottavuusmittaukset olisivat turhia. Suunnitteluvaiheessa mietinnän alla olivat erilaiset rumpujarru, levyjarru ja kitkapintavaihtoehdot, mutta kaikissa oli ongelmana rakenteellinen monimutkaisuus. Myös hinnan puolesta ajateltuna niitä ei mielellään käytettäisi. Vaihtoehtoiksi jäi muotosulkeisen mekanismin suunnittelu. Helpointa ratkaisua etsittäessä päädyttiin tapin käyttämiseen. Alun perin tappi piti sijoittaa kääntökamman lähelle helposti käytettäväksi, mutta lopullisten lujuuslaskujen jälkeen paljastui että voimansiirtomekanismi ei kestä jos se on lukittu kamman päästä. Rullaketju rakenteen yläpäässä osoittautui heikoimmaksi lenkiksi, sillä ketjun todellinen sallittu kuormitus murtolujuuteen on noin 8-12, joten ilmansuunnan lukituspaikkaa päätettiin muuttaa.

Lopullinen lukitusmekanismi perustuu neljän lukitustapin käyttämiseen ilmansuunnan kääntökehällä. Lukitustappijärjestelmä muodostaa pystyrungon ylätason ja ylätasanteen akselilla olevan lukituslevyn välille muotosulkeisen liitoksen. Lukitustappimekanismin kokoonpano nähdään kuvassa 50. Se muodostuu rungosta mihin asetetaan lukitustappi ja jousi. Jousi lukitaan rungon sisälle kiertein varustetulla rungon päädyllä. Myös tapin toisessa päädyssä on kierteet mihin tulee lenkki kiinni. Lukitussysteemi voidaan avata vetämällä lenkissä kiinni olevasta narusta tai vaijerista. Lukituksen rakenne mahdollistaa 60 eri kiinnityskohtaa eli säätökulma on 6°.

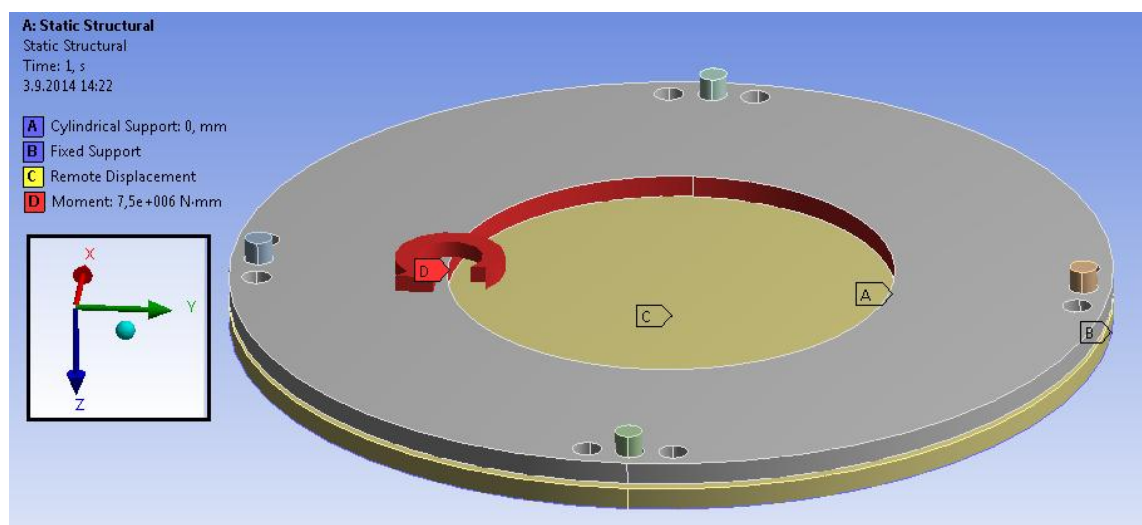


Kuva 50: Ilmansuunnan lukituksen lukitustappimekanismi

11.2.1 Ilmansuunnan lukituksen lujuuslaskenta

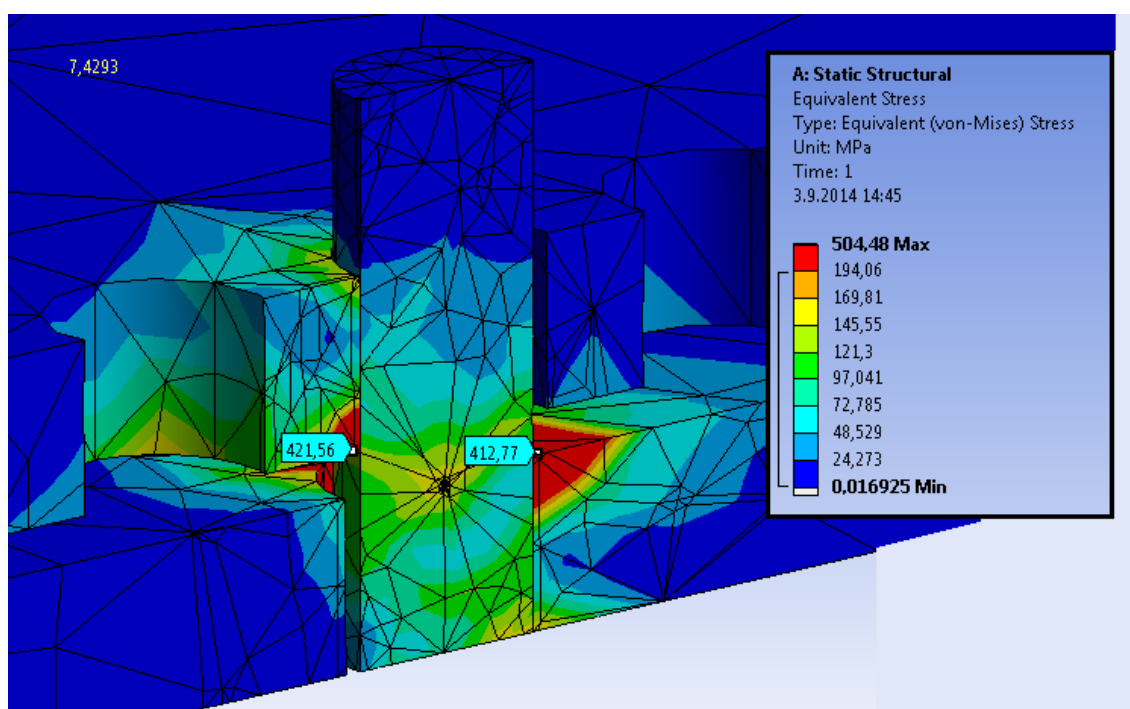
Valitussa lukitusratkaisussa oli tärkeää varmistaa rakenteen kesto ainakin lukitustapista, lukituslevystä ja lukituslevyn tuennasta. Lujuuslaskenta suoritettiin tietokonemallia ja käsinlaskentatuloksia vertailemalla ja analysoimalla.

Tapin ja lukituslevyn kestoä tutkittaessa mallinnettiin kuvan 51 mukainen yksinkertaistettu malli tilanteesta. Tilanteessa vaikuttaa suurin mahdollinen vääntömomentti suuruudella 7500 Nm. Tuntoja on asetettu lukituslevyn sisäkehälle sylinterimäinen tuenta, missä pyöriminen sallittu ja muut suunnat estetty. Pystyrungon yläpäästä esittävä levy on tuettu kiinteästi alapuolelta ja tapit on tuettu X-, Y- ja Z-suunnat estävällä tuennalla alapuoleltaan. Kappaleiden kontaktipinnoille asetettiin ehto ”no separation” eli ne eivät voi irrota toisistaan, mutta ne voivat liukua toisiaan vasten. Elementtiverkko tihennettiin yhden tapin ympäristössä ja mallinnettiin automaattiverkottajalla.



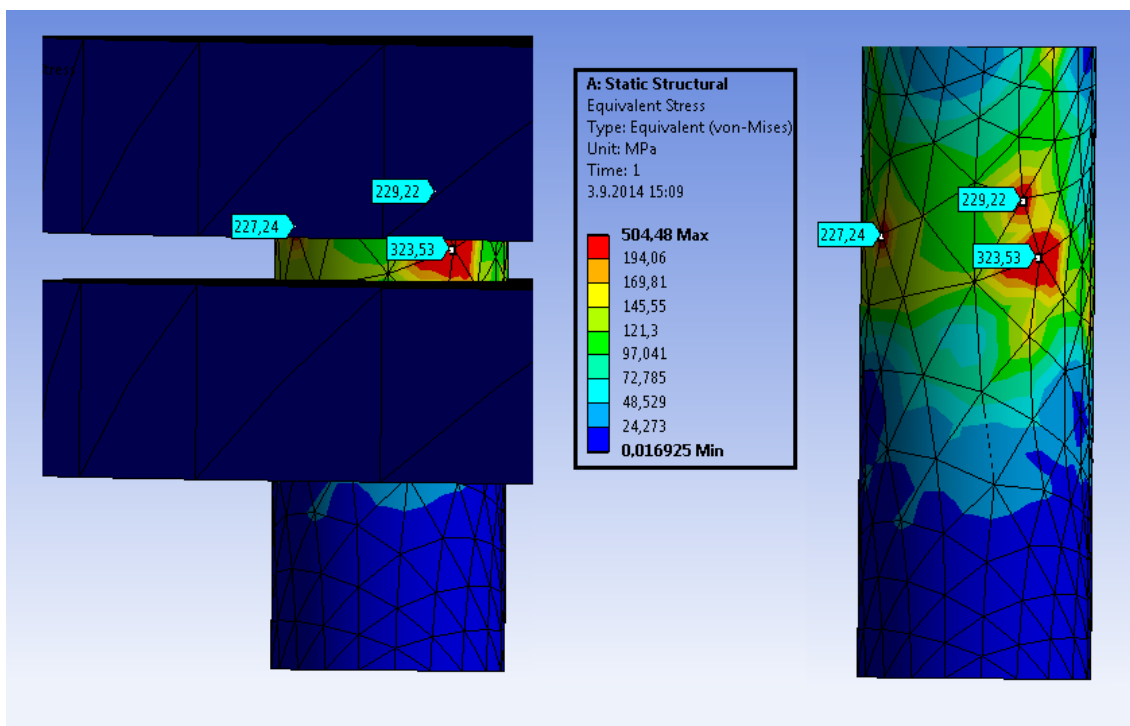
Kuva 51: Ilmansuunnan lukituksen lujuuslaskentamalli

Tuloksena saatiin kuvassa 52 näkyvä jännitys jakauma. Suurimmat jännitykset muodostuivat reikien kehälle hyvin loogiseen paikkaan. Suurinta epäloogisessa paikassa ja elementtikeskittymässä sijaitsevaa jännitystä 500 MPa ei oleteta oikeasti syntyvän, vaan luotetaan enemmän noin 420 MPa huippukuormitusten oikeellisuuteen. Jännityksessä ei ole varmuutta yhtään suhteessa materiaalivalintana olevan S420-teräksen myötörajaan, mutta varmuusluku on otettu huomioon kuormituksessa sen ollessa todellista kuormitusta suurempi.



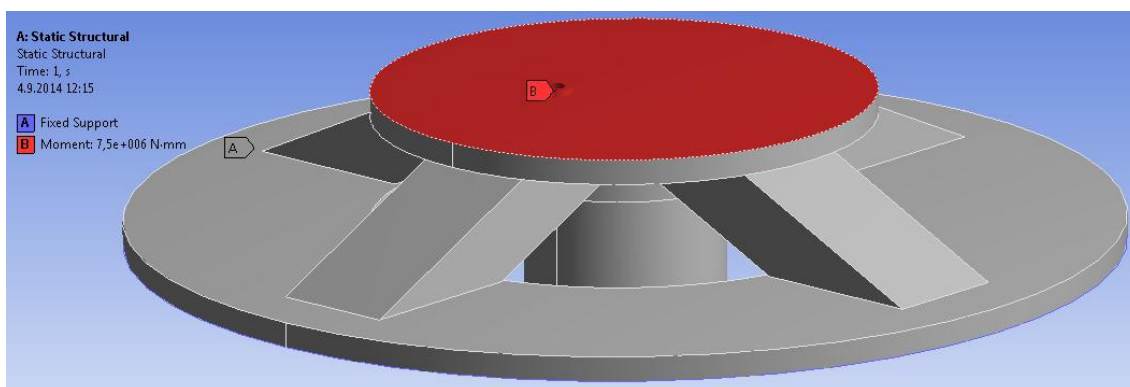
Kuva 52: Ilmansuunnan lukitussysteemin suurimmat vertailujännitykset tuentapinnoissa

Tapin kuormitusta tarkasteltiin saman mallin tuloksista. Kuvassa 53 on esitetty tapin suurimman vertailujännityksen arvo ja sijainti suhteessa tappilevyyn. Suurin jännitys 323 MPa sijaitsee suunnilleen oletetun suurimman taivutusjännityksen alueella, sekä sivussa oleva 227 MPa kuormitus voisi olettaa aiheutuvan pääosin leikkausvoimista.



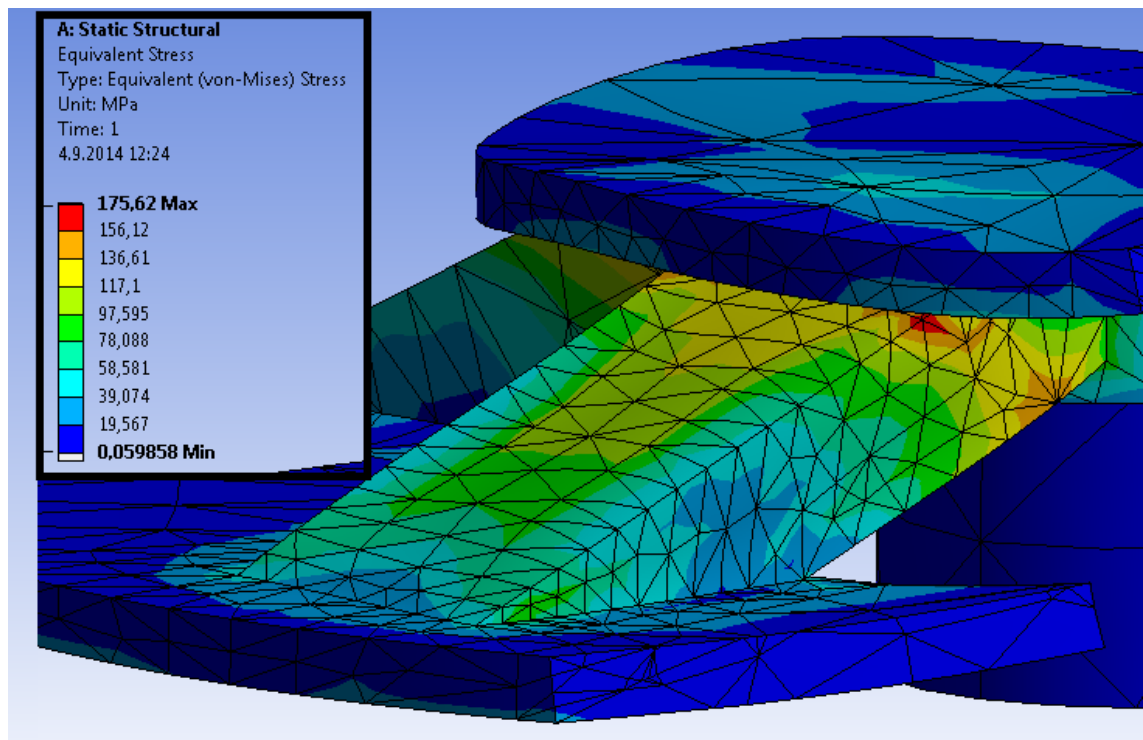
Kuva 53: Ilmansuunnan lukitussysteemin suurimmat vertailujännitykset lukitustapissa

Lukituslevyn tuentaa varten tehtiin myös oma yksinkertaistettu laskentamalli, missä tuenta asetettiin reikälevyn ulkokehälle ja kuormitus 7500 Nm ylätasolle kuvan 54 mukaisesti. Elementtiverkko tiheennettiin yhden tuen kohdalta parempien tulosten saamiseksi.



Kuva 54: Lukituslevyn tuennan lujuuslaskentamalli

Reikälevyn tuen jännitykset on esitetty kuvassa 55. Suurin jännitys on 175 MPa ja sijaitsee suorakaideprofiilin kulmissa. Sijainniltaan jännitykset ovat loogisessa paikassa ja suuruudeltaan uskottavia.

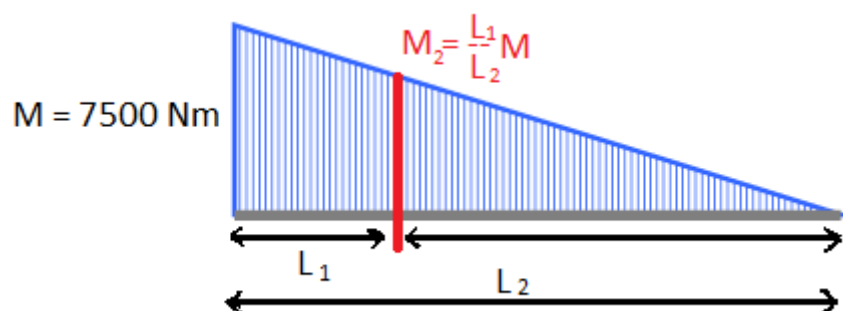


Kuva 55: Lukituslevyn tuennan suurimpien vertailujännitysten sijainti ja suuruus

11.2.2 Ilmansuunnan lukituslevyn tukipalkin käsinlasku

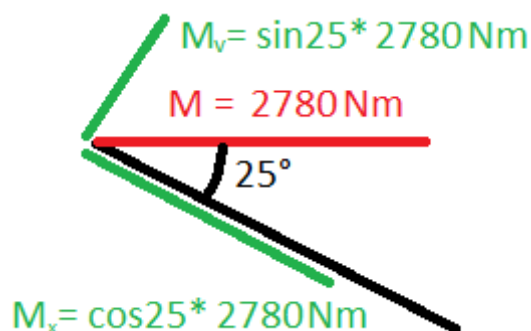
Ilmansuunnan lukituslevy kiinnitettiin käynnön akselille neljällä kehällä olevalla suorakaideputkella. Näihin putkiin kohdistuvat voimat ovat kohtuullisen suuria, joten niiden kestoä tutkimme myös käsinlaskennan keinoin.

Lukituslevyn halkaisijan suunnassa mietittynä vääntömomentista muodostuu lineaarinen momenttikuvaja. Suurimmillaan vääntömomentti on vääntökeskiössä ja pienenee tuentaa lähetessä. Lujuuslaskentamallin mukaan suurimmat vertailujännitysten arvot muodostuvat tukipalkkien yläpään, joten se otettiin käsinlaskennan tutkimiskohdaksi. Palkin yläpäässä momentti on kuvan 56 mukainen.



Kuva 56: Väännöstä muodostuva momenttikuvaja

Tukipalkit ovat kuitenkin vinossa, joten laskujen helpottamiseksi momentti jaetaan palkin suuntaisiin komponentteihin, kuten kuvassa 57 on esitetty.



Kuva 57: Vääntömomentin jakaminen tuen suuntaisiksi voimiksi

Momentista muodostuu palkille sekä taivutusta, että vääntöä. Laskenta suoritettiin liitteessä 11 esitetyllä tavalla.

11.2.3 Ilmansuunnan lukituksen tulosten vertailu

Käsinlaskenta tehtiin tapin jännityksistä ja reikälevyn tuen jännityksistä. Tapin jännityslasku suoritettiin yhden jäykän tuen ulokepalkkikaavaa ja leikkausjännityksen kaavoja käyttäen ja ne on esitetty liitteessä 10. Reikälevyn tuen lasku on liitteenä 11. Siinä asetettua momenttia jaettiin komponentteihin ja laskettiin kuormitus yhdelle tuelle, jolloin muodostuu taivutusta ja vääntöä. Näiden yhteisvaikutuksena laskettiin vertailujännitys tuelle. Taulukkoon 5 on listattu käsilaskutulokset ja tietokonemallien tulokset ja vertailtu niiden suuruuseroa. Tulokset ovat hyvin samankaltaisia paitsi leikkausjännityksen osalta. Oletettavasti FEM-mallissa esiintyvä $227,2 \text{ MPa}$ onkin jostain muusta syystä esiintyvä jännityskeskittymä, kuin leikkauksesta aiheutuva. Muilta osin tuloksia voidaan pitää luotettavina ja rakenteen olettaa kestävän kuormitukset.

Taulukko 5: Ilmansuunnan lukituksen lujuuslaskuvertailu

	FEM	käsinlasku	erotus	erotus %
Tuen suurin jännitys, Mpa	175,6	165,3	10,3	6 %
Tapin leikkausjännitys, Mpa	227,2	134,4	92,8	69 %
Tapin taivutusjännitys, Mpa	323,5	298,7	24,8	8 %

11.3 Paneelien kulman käännön vaihtoehdot

Rakennetta piti pystyä suuntamaan myös paneelien kulmaa kääntämällä. Alhaalta tapahtuva kääntökamman pyöritys piti siirtää jotenkin ylös paneelirungot yhdistävälle pääakselille. Pääakseli on sijoitettu paneelirunkojen painopisteeseen, mikä hieman vähentää mekanismille muodostuvaa kuormitusta. Kääntömekanismin vaihtoehtojen kartoituksessa parhaiten tehtävään soveltuivat taulukon 6 ratkaisut.

Taulukko 6: Paneelikulman kääntömekanismin vaihtoehtojen vertailu

Mekanismi	Huollettavuus	Toteutettavuus	Toimivuus	Hinta	Arvosana
Hydraulisyylinteri + hammastanko	4	4	3	2	13
kulmavaihde + hammasrattaat	3	3	5	4	15
kulmavaihde + rullaketju	4	4	5	4	17
Kulmavaihde	2	4	2	1	9

Hammastankoon kiinnitetyn hydraulisyylinterin suurimpia etuja olivat liikkeen helppo vieminen ylös 6 metrin korkeuteen. Voima järjestelmään olisi saatu käsikäyttöisestä hydraulipumpusta. Sylinteri olisi työliikettä tehdessään liikuttanut hammastankoa, mikä olisi liikuttanut pääakselilla olevaa hammasratasta. Yksinkertaisen rakenteensa ansiosta huollettavuus olisi ollut helppoa samoin toteutettavuus. Toimivuuden kanssa olisi talvella voinut olla ongelmia. Hintaa hydraulijärjestelmällä olisi ollut kohtalaisen paljon, sillä juuri mitään osia ei olisi voitu valmistaa itse.

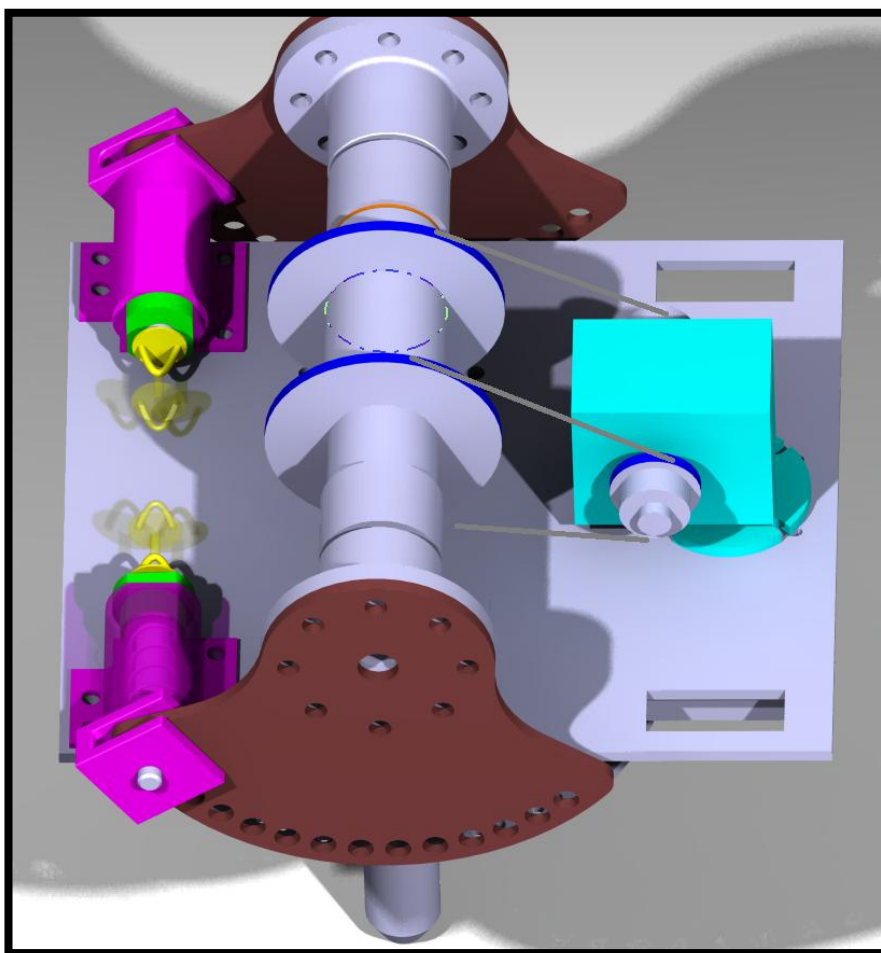
Kulmavaihteen ja hammasrattaiden yhdistelmällä huollettavuus olisi ollut hyvä. Toteutettavuus olisi myös helppo, mutta suhteellisen suuren osamäärän takia ei suuria pisteitä tule. Toimivuus olisi helposti taattavissa helposti hallittavien rakenteiden ja niiden mitoitusien takia, eikä hintakaan kyseiselle ratkaisulle olisi liian korkeaksi kohonnut.

Kulmavaihteen ja rullaketjun yhdistelmällä päästään vielä hieman parempaan lopputulokseen, kuin hammasrattailla. Osien määrä on vähäisempi ja rakenne yksinkertaisempi. Siksi huollettavuus ja toteutettavuus ovat helpompia. Mekanismin pysty akseli on myös helpompi tuoda etäälle ilmansuunnan kääntöakselilta, jolloin rakenne ei tuota ongelmia muiden rakenteiden suhteen.

Yhtenä vaihtoehtona oli vielä kulmavaihteen asentaminen suoraan pääakselin keskelle. Kulmavaihteen kuormitukset olisivat tässä tapauksessa kuitenkin hyvin suuria, mikä johtaisi hyvin suuren kulmavaihteen tarpeeseen. Suuret vaihdelaatikot ovat hyvin kalliita ja toimivuudessakin olisi ollut parantamisen varaa.

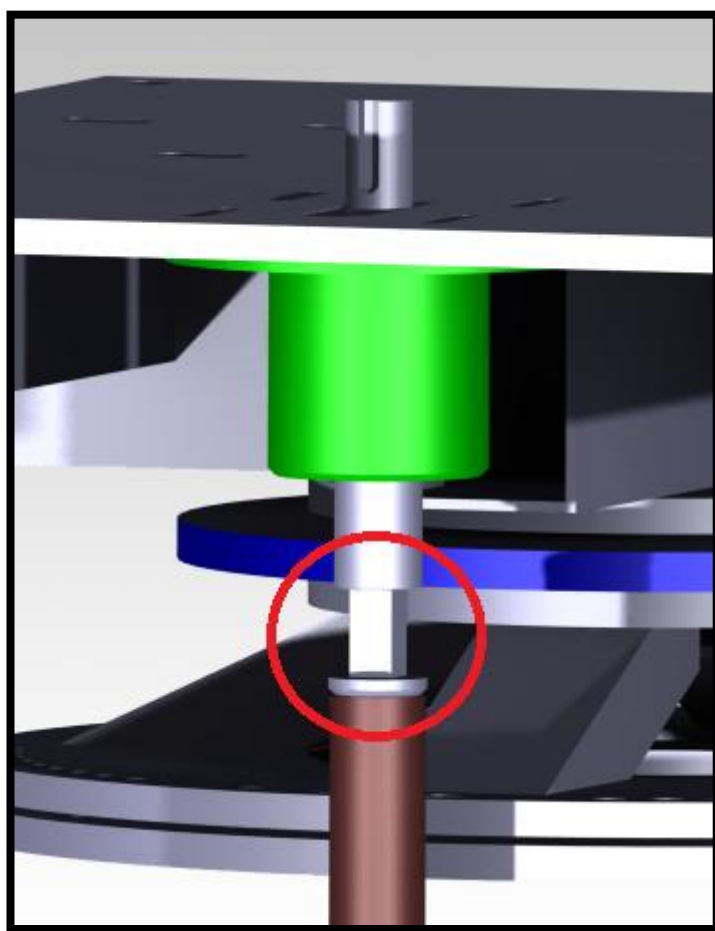
11.3.1 Paneelien kulman käännön suunnittelu

Selkeästi parhaaksi vaihtoehdoksi muodostui taulukon 6 mukaan kulmavaihteen ja rullaketjun yhdistelmä. Kuvassa 58 on esitetty mekanismin lopullinen rakenne. Kulmavaihde on kaikin puolin järkevämpää ostaa valmiina, sillä itse suunnittellessa ei olisi saavutettu mitään etua ostettuun verrattuna ja paljon työtä olisi tehty turhaan. Ketjukäytön kanssa ollaan taas ongelmissa jos rakennetta ei olisi suunniteltu akseliväliltään muunneltavaksi. Pääakselia ei voida siirtää, joten vaihdelaatikon kiinnitys suunniteltiin säädettäväksi pitkien reikien avulla. Ketjuvälitys on kaksiketjuinen ketjun kuormitusten, symmetrian ja vääntömomentin ehkäisemisen takia.



Kuva 58: Paneelikulaman kääntömekanismi

Vaihdelaatikon laippa on oikeasti suunniteltu standardi moottorikiinnitykselle. Jos tulevaisuudessa paneelijärjestelmä haluttaisiin automatisoida seuraamaan aurinkoa, niin ainakin tältä osin moottorin asennus helppoa. Nyt kuitenkin rakennetta suunniteltiin käsikäyttöiseksi ja vaihdelaatikon alle jouduttiin suunnittelemaan akselin kiinnitysrakenne. Rakenteen perusosassa on kuvassa 59 näkyvä vihreä runko minkä sisällä on liukulaakeroitu akseli joka liittää vaihdelaatikon ja pystyakselin toisiinsa. Pystyakseli on noin 5 m pitkä ja ylätasen pyörimisen johdosta sitä ei voitu kiinnittää runkoon. Asia ratkaistiin suunnittelemalla kuvassa 59 punaisella ympyröityyn kohtaan eli väliakselin ja pystyakselin väliin nivel. Monista vaihtoehdoista parhaaksi osoittautui teräksisen ristinivelen käyttö.



Kuva 59: Paneelikulman käännön pystyakselin kiinnitys vaihteeseen

Vaihdelaatikon toisioakselin ketjupyörät kiinnitetään akseliin kiilaliitoksella ja sivusuuntainen liike estetään pidätinruuvilla. Samoin ensiöakseli tulee vaihdelaatikkoon kiilaliitoksella. Ristinivel kiinnitetään pidätinsokalla väliakseliin ja pyöritysakseliin.

11.3.2 Paneelien käännön laskut

Käännön lujuuslaskennalla varmistuttiin akselinliitoksissa käytettyjen kiilojen kestäminen, pyöritysakselin vääntömomentin kesto, mitoitettiin vaihdelaatikko ja varmistuttiin valitun ketjun kestästä. Kaikki näitä laskuja koskevat laskut on esitetty tarkemmin liitteessä 12.

Kiilaliitoksissa tutkittiin navan ja akselin momentinsiirtokyky erikseen käyttämällä kaavaa 43. Kaavassa p on sallittu pintapaine, l on kiilan pituus, t on akselin tai navan uran syvyys ja d on akselin halkaisija. (Koneenosien suunnittelu, s.383)

$$M_v = plt \frac{1}{2}(d + t) \quad (43)$$

Kiiloiksi valittiin toisioakselin ja ketjupyörän väliin DIN 6885A St 8x8x30 tasakiila ja vaihdelaatikon ja väliakselinväliin DIN 6885A St 6x6x30 tasakiila.

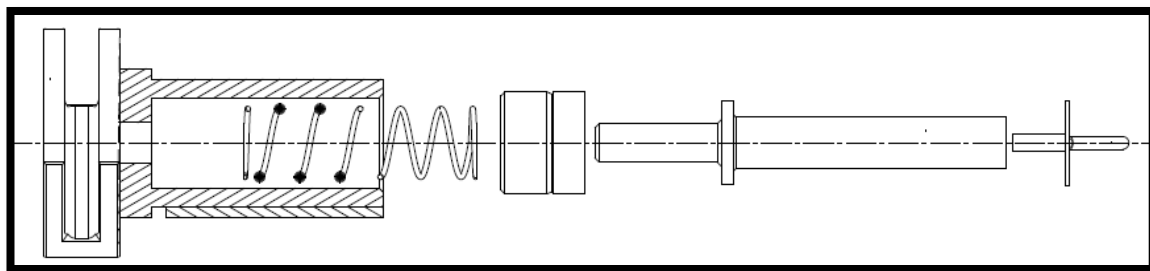
Vaihdelaatikko valittiin kestämaan oletettuun kulman kääntämiseen tarvittava ensioakselin vääntömomentti 18 Nm. Tarvittava vääntömomentti arvioitiin selvittämällä paneelirunkojen hitausmomentti J pääakselin suhteen ja määrittämällä suurimman kulmakiihtyvyyden α arvoksi $0,5 \text{ rad/s}^2$, jolloin kaavasta 44 saadaan kääntämiseen tarvittava momentti. Vaihdelaatikoksi valittiin Motovario NMRV 050 I=10 80B14. Vaihteisto kestää pääakselilta muodostuvat kuormat hyvin noin 350 Nm asti, mutta esimerkiksi lunta paneelien päältä pois kallistaessa kulma tulee lukita lukitustappien varaan, eikä vaihteiston varaan.

$$T = J\alpha \quad (44)$$

11.4 Paneelien käännön lukitus

Paneelikulman lukitus päätettiin toteuttaa myös tappilukituksella. Muita vaihtoehtoja olisi ollut pääakselille asennettava levyjarru tai muu jarruratkaisu. Lukitus toteutettiin suoraan pääakselille, jotta kääntömekanismiin ei syntyisi liian suuria voimia. Pääakselille toteutetun lukituksen kuitenkin tulisi silloin kestää kaikki kuormat ja olla rakenteeltaan jyrkempi. Alun perin lukituslevy piti sijoittaa levyketjupyörien väliin,

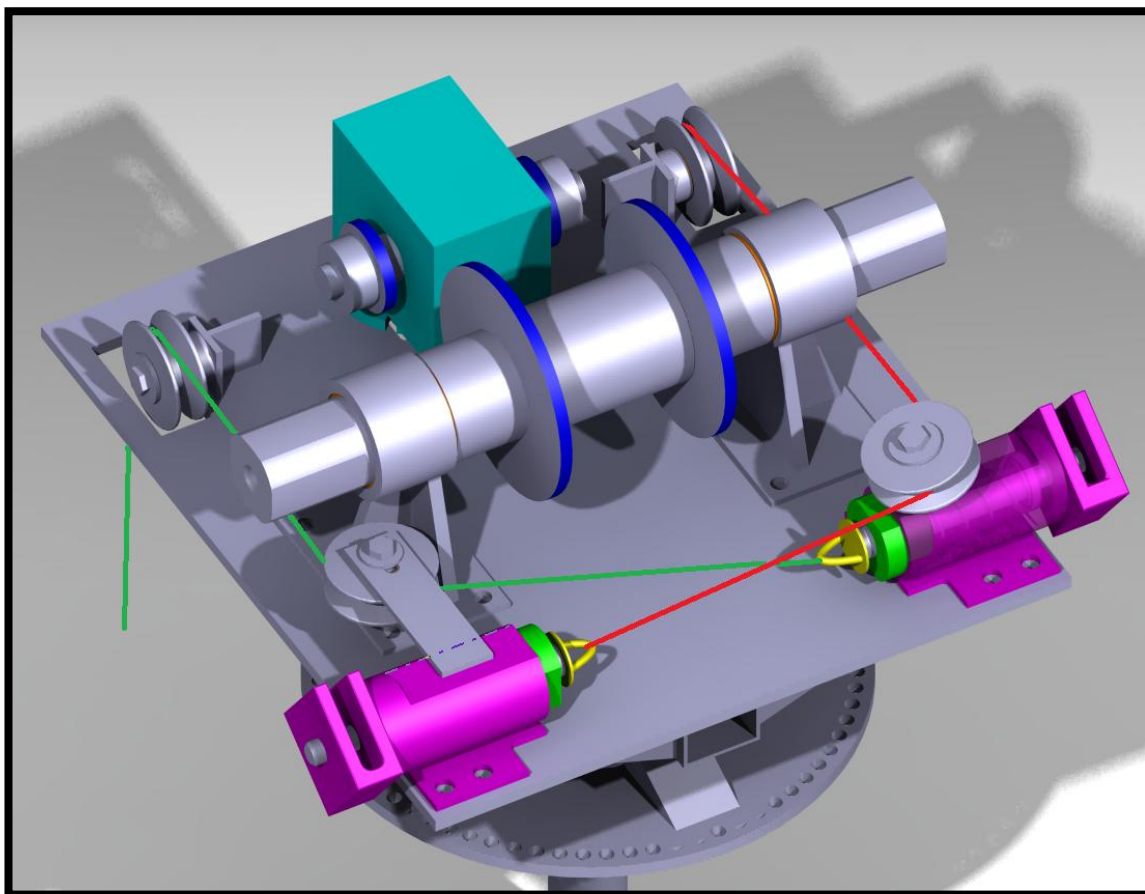
mutta ongelmaksi syntyivät liian suuret voimat. Lukituslevyn halkaisija tuli suunnitella mahdollisimman suureksi, jotta kääntökehälle saadaan mahdollisimman monta reikää eli monta lukituskulmaa. Tavoitteena oli saavuttaa noin 3 asteen säädöllä varustettu kulmalukitus, mutta eri vaihtoehtojen läpikäynnin ja lujuuslaskujen jälkeen päädyttiin 4 asteen säätöväliin. Pääakselin päissä sijaitsevien reikälevyihin reiät saatiin 8 asteen välein, mutta ne on asetettu toimimaan vuorotellen eli vain yksi lukitustappi on kerrallaan lukitustilassa.



Kuva 60: Paneelikulman lukitustapin kokoonpanokuva

Rakenteeltaan tappilukitus muodostui kuvan 60 näköiseksi. Rakenne muodostuu runko-osasta minkä sisälle asetetaan palautinjousi ja lukitustappi. Kierteillä varustettu rungon päätyosa pitää jousen ja tapin rungon sisällä. Runkoon jouduttiin suunnittelemaan lukitustapille kaksipuolisen tuen mahdollistava uloke. Yksituentaishana ulokepalkkina tarkasteltuna tappi joko leikkautuisi leikkausvoimien tai murtuisi taivutusjännitysten takia.

Lukitustapin vapauttamiseksi lukitustappi pitää pystyä vetämään jotenkin alhaalta käsin. Sähkökäyttöisyys mahdollistaisi kaikenlaisia mahdollisuuksia, mutta nyt vetävä liike piti välittää alas mekaanisesti. Tilan puute ja rakenteelliset seikat eivät helpottaneet vaihtoehtojen kehittämistä. Lopulta päätettiin kehittää vaijeritoiminen ratkaisu missä vaijeripyörät ohjaavat vaijerin oikeaan paikkaan altaassa koneistossa. Toinen vaihtoehto olisi ollut ohjata vaijeria putken sisällä, mutta toimivuuden varmistaminen olisi ollut vaikeampaa ilman prototyyppiä, joten päädyttiin käyttämään vaijeripyöriä. Kuvassa 61 näkyy valmiin ratkaisun malli.

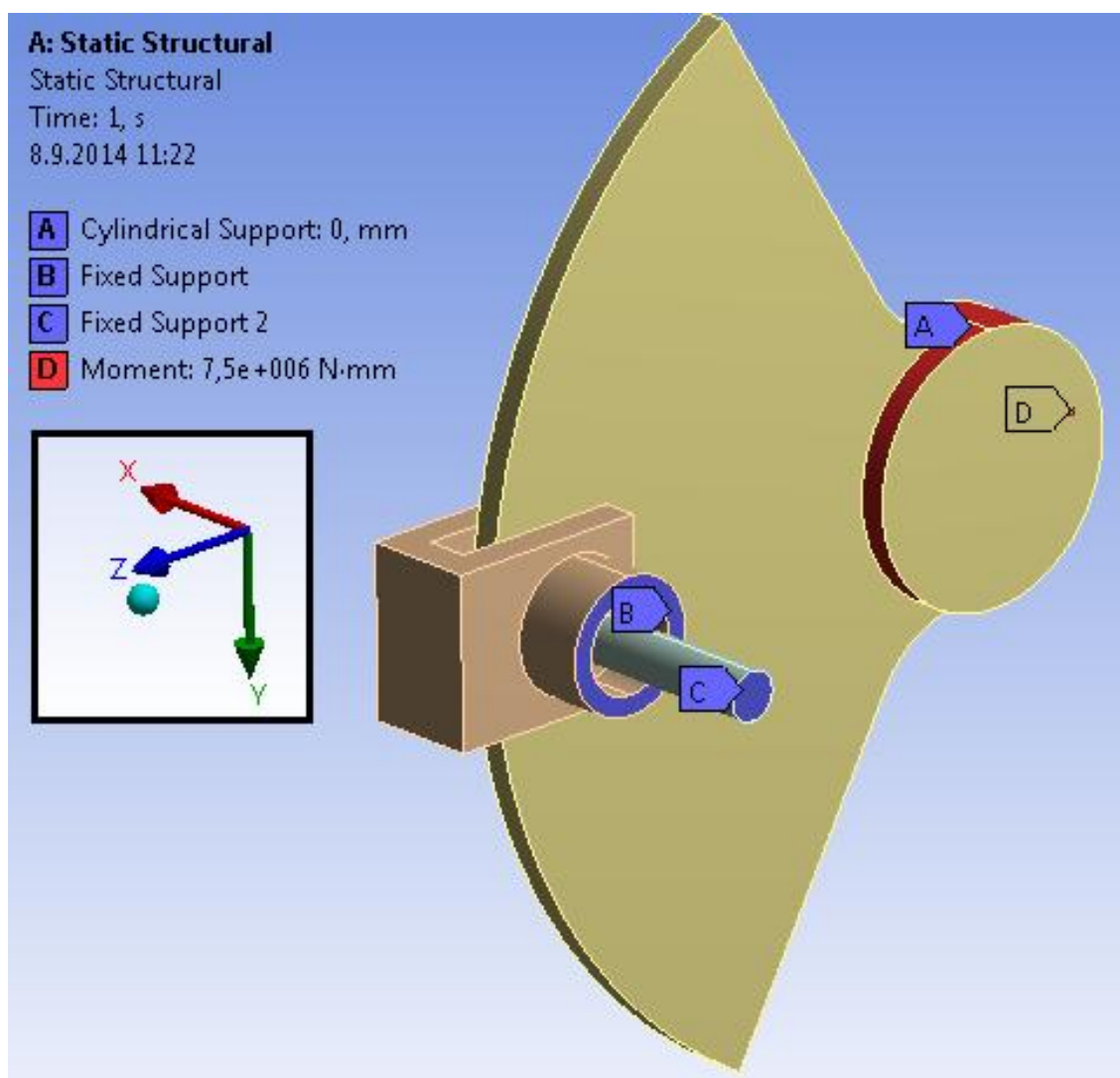


Kuva 61: Paneelikulman lukitustappijärjestelmän aukaisuvaijerit

11.4.1 Paneelien käännön lukituksen lujuuslaskenta

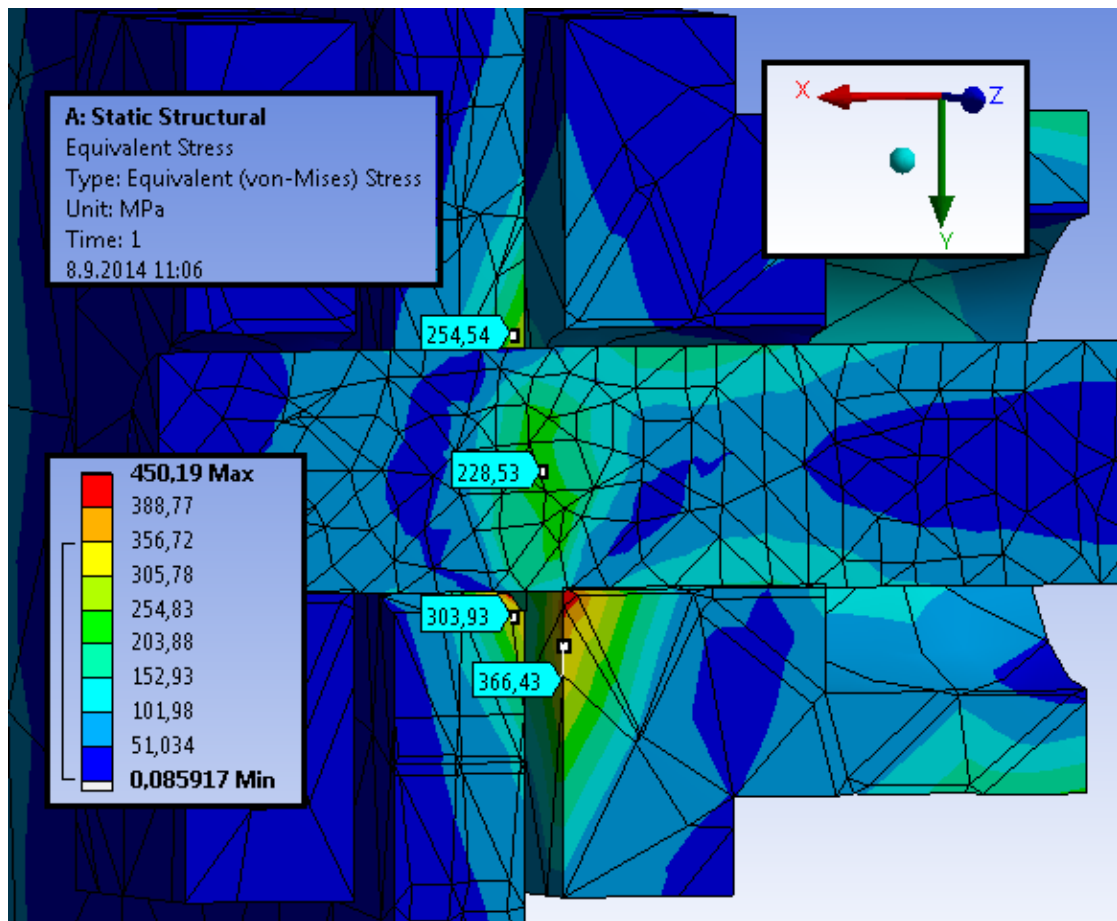
Lukituksen suunnittelussa oli tärkeintä selvittää lukitustapin kestäminen kuormitusten alaisuudessa. Samoin lukituslevyn tuli kestää siihen vaikuttavat voimat. Rakenteissa tarkasteltiin pintapaineita, taivutuksia ja leikkauksia. Lisäksi tehtiin lujuuslaskentamalli runkorakenteita ja sen kestosta.

Tapin kestoja ja tappirungon kestoja tarkasteltiin kuvan 62 mallin avulla. Lukitustappi ja lukitustapin runko ovat tuettuna kiinteästi. Lukituslevy tuettiin sylinterimäisellä tuennalla. Mallin kuormitus asetettiin 7500 Nm suuruiseksi lukituslevyn akselipinnalle. Kuorma vastaa noin 850 kg lumikuormituksen sijoittumista täysin epäkeskeisesti vain yläpaneeleille tai alapaneeleille. Tilanne on sinänsä epätodennököinen, mutta mahdollinen esimerkiksi lumen liukuessa kaltevaan kulmaan asetettujen paneelien mukaisesti.



Kuva 62: Paneelikulman lukituksen lujuuslaskentamalli

Tuloksina syntyi kuvassa 63 nähtävä jännitys jakauma. Jännitykset ovat odotetusti korkeita, mutta suuruudeltaan siedettäviä. Tappirungon sisäkulman jännityshuippu jakautuu oikeasti tasaisemmin rakenteelle eikä aiheuta esitetyn suuruista huippua. Muilta osin jännitystaso on alle myötörajan, mikä riittää varmuuden ollessa sisällytettynä kuormitukseen. Laskentamallin mukaan tapin suurin vertailujännityksen arvo on 260 MPa.



Kuva 63: Paneelikulman lukituksen vertailujännitysten tulokset

Käsinlasku suoritettiin vain lukitustapin jännityksiä ja pintapainetta selvittämällä. Maksimijännityksen laskut ovat liitteessä 13. Herzin pinta-paineeksi kaavalla 45 saatiin kahden lieriön kosketustapauksessa tapin ja lukituslevyn välille noin 910 MPa. Sallittu arvo S355 teräkselle on 950 MPa – 1050 MPa, joten arvo on hyväksyttävä. (Tribologia – kitka kuluminen ja voitelu, s.37)

$$p_0 = \sqrt{\frac{F_N E'}{\pi L R'}}, \text{missä} \quad (45)$$

$$E' = \frac{1}{\sqrt{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}}} \quad (46)$$

$$R_c = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (47)$$

Kaavoissa F_N on rakennetta kuormittava voima, E :t ovat materiaalien kimmokertoimet, R :t ovat tappien säteet ja ν :t ovat materiaalien poissonin vakiot.

Jännitykset selvitettiin leikkausjännityksen suhteen ja oletetun taivutusjännityksen suhteen. Taivutusta yritettiin laskea parhaiten tilannetta kuvaavan palkin taivutustapauksen avulla, mutta ilmeisesti tapin käyttäytyminen on kaukana käsinlaskussa oletetusta tapauksesta. Eroa käsinlasketun ja tietokonemallin välillä taivutusjännityksen suurpiirteisessä vertailussa oli melkein 50 %. Käsinlaskutuloksen korkean jännityksen johdosta päätettiin kuitenkin käyttää tapin materiaalina hyvin kulutusta ja taivutusta kestävää hiiletysterästä. (Koneenosien suunnittelu, s.144)

Leikkausjännityksen kohdalla päästiin parhaiten samoihin tuloksiin, jolloin voidaan tulosten perusteella ainakin tapin kestävä muodostuvat leikkausjännitykset. Tosin lujuuslaskentamalli näyttää vain vertailujännitysten arvoja, mutta tapin reunoille muodostuvien jännitysten voidaan surimmilta osin ajatella olevan leikkauksesta aiheutuvia. Käsinlaskennan ja laskentamallin tulokset yhteenvetona taulukossa 7.

Taulukko 7: Paneelikulman lukituksen lujuuslaskujen vertailutaulukko

	FEM	käsinlasku	erotus	erotus %
Tapin leikkausjännitys, Mpa	260	228	32	14 %
Tapin taivutusjännitys, Mpa	257	473	-216	-46 %
Tason pintapaine, Mpa	-	909	-	-

12 TYÖPIIRUSTUKSET

Opinnäytetyön pääasiallisena tavoitteena oli tuottaa aurinkopaneelijärjestelmän valmistamiseen tarvittavat työpiirustukset. Piirustukset pyrittiin laatimaan jokaisesta valmistettavasta rakenteen osasta, sekä tekemään niistä kokoonpanopiirustukset jokaisesta kokoonpanovaiheesta. Piirustuksia kerittiin laatimaan noin 80 erilaista ennen päätöstä olla valmistamatta kyseistä runkorakennetta oikeasti. Suurin osa piirustuksista on erittäin yksinkertaisista kappaleita, joten niitä ei ole tässä työssä esitelty mitenkään. Muutamia piirustuksia esitetty opinnäytetyön liitteissä.

Pääakselin työpiirustus on liitteessä 14. Keskivaihteen katteen piirustus liitteenä 15. Lisäksi ylärunгон keskiosan sivutuen hitsauskokoonpano liitteenä 16 ja pääakselin asennuskokoonpano liitteenä 17. Tasanteen akselin työpiirustus liitteenä 18.

Piirustuksia laadittaessa pääsi käyttämään monipuolisesti koneenpiirustuksen keskeisiä oppeja. Ennen kaikkea laadittaessa on pyritty helppoon ja yksiselitteiseen esitystapaan, sekä käyttämään sovittuja piirustusmerkkejä. Lähteenä piirustuksia laadittaessa käytettiin Aimo Pereen Koneenpiirustus 1 ja 2 kirjaa.

13 RAKENTEIDEN KORROOSIOSUOJAUS

Teräsrakenteet on lähes aina pintakäsiteltävä korroosiota vastaan. Korroosiota tapahtuu joko kemiallisen tai sähkökemiallisen reaktion johdosta. Korroosiossa ainevahvuus heikkenee rakenteessa ja saattaa epäsuotuisassa paikassa johtaa rakenteen murtumiseen. Teräsrunkoinen rakennelma voidaan suojata korroosiolta seuraavilla menetelmillä: (Teräsrakenteiden suunnittelu, s.163)

Teräs voidaan tehdä ruostumaksi seostamalla siihen paljon kromia tai nikkeliä, jolloin rakenteesta saadaan ruostumaton tai jopa haponkestävää. Tavallisissa runkorakenteissa ruostumattomien terästen käyttäminen on hyvin kallista ja siksi hyvin harvoin käytetty menetelmä.

Käyttöympäristö voidaan muuttaa kuivaksi ja poistaa ympäröivästä ilmasta kosteus. Teräksissä ei tapahdu korroosiota mikäli ilmankosteus on pysyvästi alle 60 %. Käytännöllisyydeltään tapa soveltuu vain hyvin rajattuihin käyttötarkoituksiin ja ei sovellu ulkoilmarakenteisiin ollenkaan.

Katodin käyttäminen rakenteessa, jolloin katodi korrosoituu ennen terästä ja näin säästää teräsrakenteen korroosiolta. Tapaa voidaan käyttää vain sähköä johtavassa ympäristössä kuten vedessä. Teollisuuden käyttökohteita katodisuojaus on mm. laivojen rungot, satamarakenteet ja öljynporauskalusto.

Yleisin keino korroosiota vastaan on pinnoittaminen epäorgaanisella tai orgaanisella materiaalilla. Suojaavia kerroksia voivat olla metallit, emalit, maalit, bitumituotteet tai muovit.

13.1 Korroosiosuojan valinta

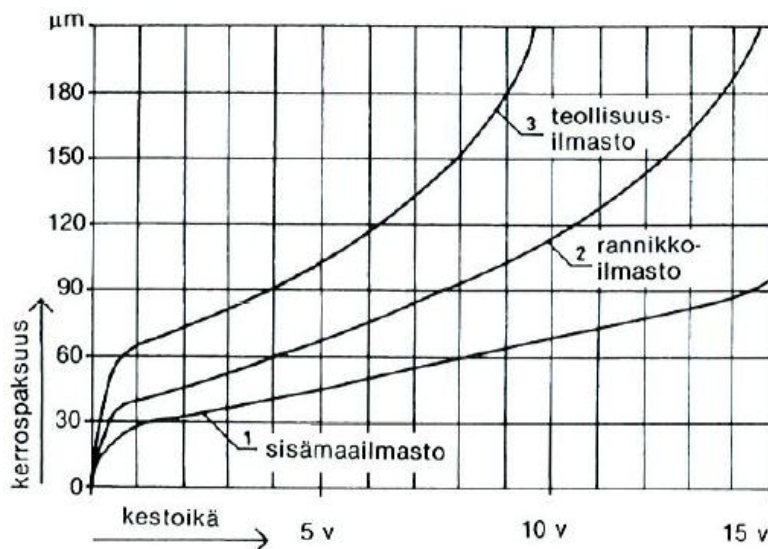
Runkorakenteen korroosiosuojausta valitessa mietittiin kustannustehokkuutta ja korroosiosuojauksen tasoa. Lähtökohtaisesti oli hyvä tietää, että rungon valmistuspaikassa Tampereen aikuiskoulutuskeskuksella on oma maalauslinja, mitä voitaisiin käyttää. Sinkitykseen tarvittaisiin jokin ulkopuolinen taho ja se olisi

suhteellisen kallista. Hintaa ei voida kuitenkaan pitää pinnoitteen kestoja ja huoltomahdollisuutta tärkeämpänä ja valinta tehtiin enemmän niitä painottaen.

Lopulta päädyttiin valitsemaan kuumasinkitys kaikille ylärunkorakenteille ja tasanteen rakenteille. Pystyrunko ja kaikki siihen kiinnittyvät osat maalataan. Valinnassa ajateltiin, että pystyrungon alueelle on helppo päästä huoltamaan maalipintaa jos ja kun maalipinta vaurioituu. Ylärakenteisiin on taas huonompi päästä maalaamaan, joten sen korroosiosuojaus toteutettiin sinkitsemällä. Tilaajan halutessa voidaan myös sinkityt osat maalata yhtenäisemmän ulkonäön ja paremman korroosiosuojan takaamiseksi.

13.1.1 Korroosionestomaalaus

Korroosionestomaalauksella on ensisijaisesti tarkoitus saavuttaa riittävän tehokas korroosiosuojaus kulloinkin vallitsevia ympäristöolosuhteita vastaan. Toissijaisesti maalauksella voidaan vaikuttaa rakenteiden ulkonäöllisiin seikkoihin. Suojaustapa perustuu katodisen ja anodisen reaktion pysäyttämiseen ja estämällä sähkövirran kulku paikallisparin elektrolyytissä. Maalipinnan kestoikään voidaan vaikuttaa maalipinnan paksuudella. Paksuuden vaikutusta kestoikään on esitetty kuvaajassa 64. (teräsrakenteiden suunnittelu s.164)



Kuva 64: Maalipinnoitteen paksuuden vaikutus korroosiosuojauksen kestoikään (teräsrakenteiden suunnittelu, s.166, kuva 8.3)

Maalauksen onnistumisessa on tärkeää huolehtia pinnan puhdistuksesta. Epäpuhtaudet, lika ja ruoste tulee poistaa huolellisesti erityisesti hitsisaumojen kohdalta. Puhdistus voidaan suorittaa mekaanisesti harjaamalla, hankaamalla ja hiekkapuhaltamalla, sekä pesemällä pinta alkaali-, emulsio- tai liuotinpesulla.

Korroosionestomaaleja on nestemäisiä ja jauhemaisia, sekä niitä on fysikaalisesti kuivuvia ja kemiallisesti kuivuvia. Kaikille on omat käyttökohteensa ja hyvät ja huonot puolensa. Taulukossa 8 nähdään yleisimpien korroosionestomaalien ominaisuuksia. Tässä opinnäytetyössä maalaussuunnitelman tarkempi valinta jätetään maalauksesta vastaavan osaston ja työ tilaajan tarkemmin päätettäväksi.

Taulukko 8: Erilaisten korroosionestomaalien ominaisuuksia (teräsrakenteiden suunnittelu, s.168, taulukko 8.3)

Maalityyppi Ominaisuus	Alkydi- maalit		Epoksi- reaktio- maalit		Harts- modi- fioit epoksi- maalit	Epoksi- terva- maalit	Poly- uretaani- maalit	Kloori- kautsu- maalit	Vinyyli- maalit	Sinkki- sili- kaatti- maalit	Silikon- maalit
	Hitaat	Nopeat	Liut- ohenteiset	Liut- teet- tomat	EH	ET	PUR	KK	V	SS	SI
MAALAUSOMINAISUUDET											
Maalin siveltävyys	1	2	2	3	2	2	2	3	3	3	2
Maalin ruiskutettavuus	1	1	2	3	2	2	3	2	2	3	2
Soveltuvuus maalaamomaalaukseen	3	1	1	1	1	1	1	3 1 ¹⁾	3 1 ¹⁾	2	2
Soveltuvuus kenttämaalaukseen	1	3	2	3	2	2	2	1	1	1	3
RASITUSKESTÄVYYS											
Puhdas maaseutuilmasto	1	1	2 ²⁾	3 ²⁾	2 ²⁾	2 ²⁾	1	2	2	1	1
Teollisuusilmasto	2	2	2 ²⁾	2 ²⁾	2 ²⁾	2 ²⁾	1	1	1	3	2
Upotus veteen	—	—	2	1	2	1	2	2	2	3	—
Upotus maahan	—	—	2	1	2	1	—	3	3	3	3
Hapot	—	—	2	2	3 ³⁾	2 ³⁾	2	2 ³⁾	2 ³⁾	—	—
Emäkset	—	—	2	1	2 ³⁾	2 ³⁾	2	2 ³⁾	2 ³⁾	—	—
Liutot	—	—	2	3	2 ³⁾	2 ³⁾	2	2 ³⁾	2 ³⁾	—	—
Öljyt	2	2	1	1	1	2	1	—	—	1	—
Kulutus	2	2	1	1	2	2	—	—	—	1	3
Lämpö	3	3	2	2	2	2	2	3	3	1	3

1 = Erittäin hyvä
2 = Hyvä
3 = Tyydyttävä
— = Heikko

1) Suuret kappaleet, joita ei ladota päällekkäin

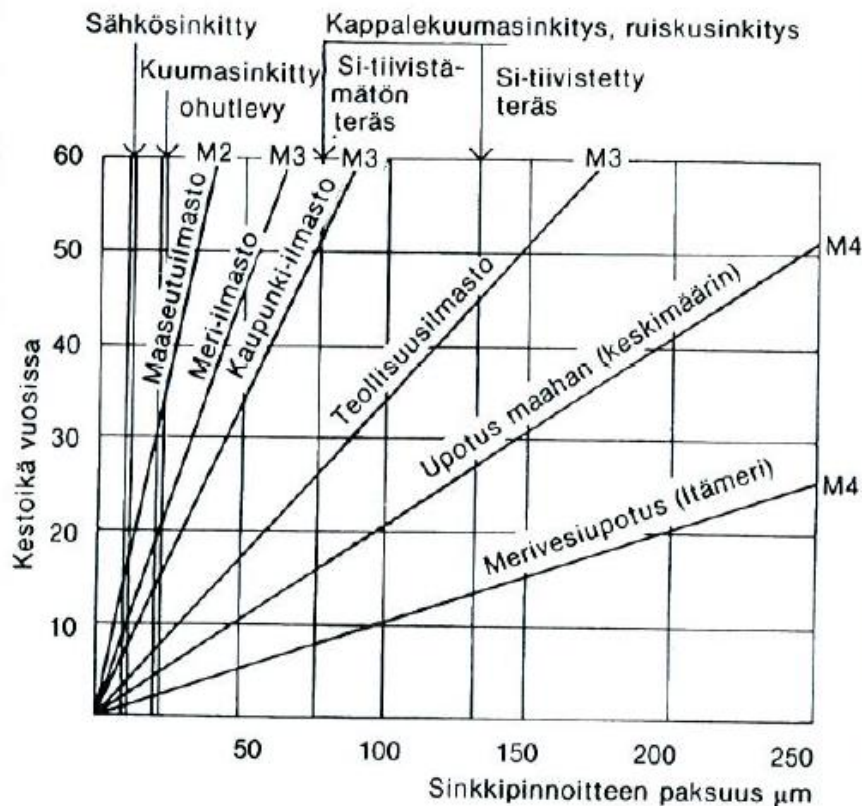
2) Auringon ultraviolettisäteily aiheuttaa maalin liituuntumista ja värisävyn muuttumista

3) Roiskeina

13.1.2 Kuumasinkitys

Kappaleen sinkitystapoja on muitakin, kuin kuumasinkitys. Nämä ovat ruiskusinkitys, sähkösinkitys ja sinkkipölymaalaus. Kuumasinkitys on kuitenkin ylivoimaisesti käytetyin. Siinä ruosteesta, öljystä ja muista epäpuhtauksista puhdistettu kappale upotetaan kuumaan sinkkikylpyyn, jolloin kappaleen pinnalle muodostuu rautasinkkiyhdisteistä ja puhtaasta sinkistä koostuva kerros. Kerros tarjoaa suojattavalle kappaleelle erittäin hyvän korroosiokestävyyden, mekaanisen rasituksen- ja hankaavan kulutuksen kestävyys. Sinkkikerroksen paksuutta kontrolloimalla voidaan vaikuttaa pinnoitteen kestoikään. Kestoikä on hyvin pitkä pienilläkin ainepaksuuksilla, mikä takaa pienen huollon tarpeen. Paksuuden vaikutus kestoikään nähdään kuvaajassa 65. Puunjalostusteollisuuden tekemän tutkimuksen mukaan keskimääräiset syöpymät

ulkorakenteissa ovat 0,8 - 1,5µm vuodessa.
(<http://www.kuumasinkitys.fi/kestavyys.html>)



Kuva 65: Sinkkipinnoitteen paksuuden vaikutus kestoikään eri ympäristöissä ja valmistustavoilla (teräsrakenteiden suunnittelu, s.170, kuva 8.6)

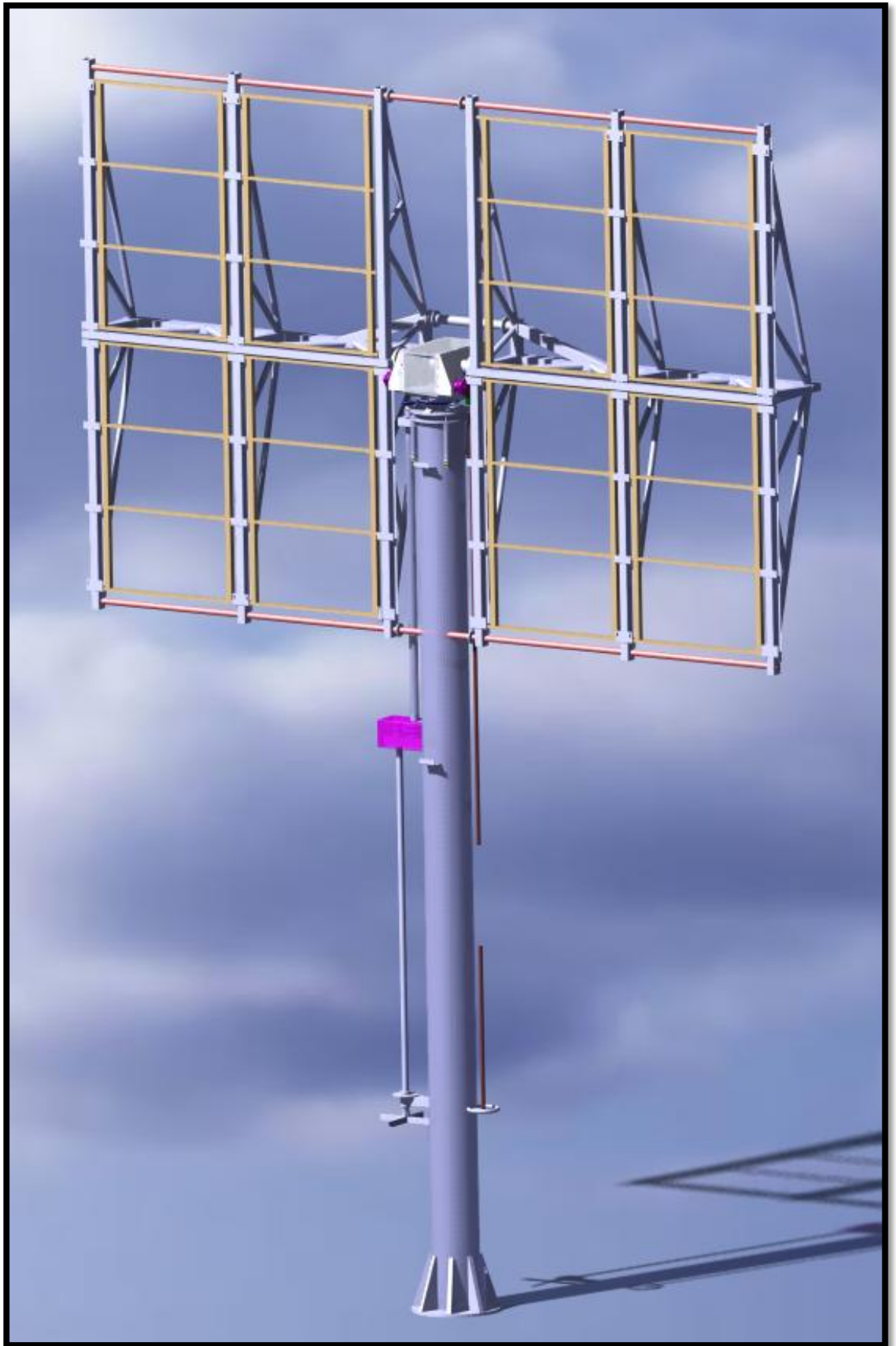
Kuumasinkitys asettaa rakenteelle muotovaatimuksia, jotka tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Rakenteessa ei saa olla ahtaita rakoja tai umpinaisia rakenteita, vaan ne tulee varustaa tuuletusaukoilla. Jos näitä ei tehdä voi peittaushappo tunkeutua umpinaiseen rakenteeseen ja kuumaan sinkkiin upotettaessa se höyrystyy aiheuttaen räjähdysvaaran.

Rakenteeseen ei voi tehdä reikiä lujuuden heikkenemisen takia, vaan rakenteet sinkitään osina. Hitsatun rakenteen sinkitys myös maksaisi enemmän ja kuljetus olisi hankalaa. Ongelmaksi erikseen sinkittämisessä muodostuu rungon kokoonpanohitsauksessa saumojen kohdalta häviävä sinkkikerros. Tämä asia hoidetaan erittäin huolellisella saumojen puhdistuksella ja tarkalla sinkkipölymaalauksella. Puhdistus ennen maalausta pitää tapahtua vähintään suihkupuhdistuksen asteen Sa 2,5 (SFS 8501-1) eli paljaalla silmällä tarkastellessa pinnalla ei saa olla öljyä, valssihilsettä tai muuta likaa. Pinnalle jäävät epäpuhtaudet saavat näkyä korkeintaan heikkoina varjostumina. (Teräsrakenteiden suunnittelu, s.170)

14 POHDINTA

Aurinkopaneelijärjestelmän suunnittelutyö saatiin työn tavoitteiden mukaisesti valmiiksi, vaikka se työn edetessä paisui ehkä liikaakin nähden normaalin opinnäytetyön laajuuteen. Työ oli hyvin laaja-alainen, joten sen avulla pääsi laajasti kertaamaan vanhoja asioita ja oppimaan uutta. Monet uudet asiat olisivat kuitenkin vaatineet hyvin laaja-alaista asian ymmärtämistä parhaan lopputuloksen varmistamiseksi, joten tässä työssä on jouduttu paikoitellen ottamaan vaillinainen osaaminen huomioon rakenteiden ylimitoituksella. Voidaan kuitenkin ajatella, ettei yhden hengen suunnitteluryhmä tuota parasta tulosta, vaan työ olisi voitu pilkkoa ainakin yhdelle lisähenkilölle. Käytettävissä olleet resurssit huomioiden lopputulos on kuitenkin hyvä ja se ylittää teknisiltä ominaisuuksiltaan alkuehtoina vaaditulle tasolle. Suunnittelutyön lopputulos on esitetty kokoonpanona kuvassa 66.

Rakennelman lopputulos voisi olla kohtuullisen helposti vietävissä valmistusvaiheeseen asti, vaikka tämän projektin puitteissa sitä ei tapahtunutkaan. Tosin lähtökohtaisesti suunnitellun kaltainen aurinkoa kohti suunnattava rakennelma tulee kalliimmaksi, kuin peruskiinnityksellä varustettujen paneelien käyttö. Tämän takia on monesti tehokkaampaa hankkia suuntauksesta tulevan energiatuoton kasvun verran enemmän aurinkopaneeleita ja käyttää vakioasennusta. Oikeasti suuntaavaan järjestelmään tulisi suunnitella myös automaatiojärjestelmä huolehtimaan suuntauksesta, mikä lisäisi entisestään kustannuksia. Päätös jättää järjestelmä valmistamatta oli varmasti oikea riskienhallinnankin kannalta. Vaikka lukuuslaskennassa ja komponenttien mitoituksessa on oltu huolellisia ja varmuutta on jätetty, niin aina voi olla jotain jäänyt huomaamatta, mikä johtaa jonkin rakenteen pettämiseen tai ennenaikaiseen kulumiseen.



Kuva 66: Lopputyössä suunniteltu aurinkopaneelijärjestelmä

LÄHTEET

Airila Mauri, Ekman Kalevi, Huhtala Pekka ym. , Koneen osien suunnittelu (KOS), Sanoma Pro

Braja M. Das, 2004, Principles of Foundation Engineerin, Thomsons Books/Cole

Eero Saarinen, Leo Kähkönen, 2005, Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja, Suomen betoniyhdistys

Eero Saarinen, 1986, RIL125 Teräsbetonirakenteet, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL

<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/metallituotemaalaus/lm7.html>

Seppo Kivioja, Seppo Kivivuori, Pekka Salonen, 2001, Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu, Otatieto OY

Aimo Pere, 2007, Koneenosien piirustus 1 & 2, Kirpe OY

Jukka Kinnunen, Eero Saarinen, Seppo Tiira, Seppo Ulvinen, Eino Väänänen, 2001, Teräsrakenteiden suunnittelu, Rakennustieto OY

<http://www.kuumasinkitys.fi/>

http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_5_Pilarit.pdf

https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDF-versio.pdf

<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/alykas-verkko>

<http://www.fortum.com/countries/fi/yksityisasiakkaat/sahkon-siirto-ja-liittymat/sahkoverkoston-kehittaminen/alykas-sahkoverkko/pages/default.aspx>

<http://www.tem.fi/files/37120/Tampere.pdf>

EN1991-1-4: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuorma

EN1991-1-3: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuorma

Tapani Jokinen, Tuotekehitys, 2001, Aalto yliopisto

Perustuksen mitat: (iteroimalla haettiin sopivat arvot)

Leveys:	$L := 1.7r$	Keskiosan leveys:	$L_2 := 0.6r$
Pituus:	$B := 1.7r$	Keskiosan pituus:	$B_2 := 0.6r$
Alaosan paksuus:	$h_1 := 0.35r$	Keskiosan korkeus:	$h_2 := 1.5r$

Maaperän ominaisarvot:

Maaperän tiheys: (hiekkä)	$\gamma := 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Maaperän leikkautumiskulma:	$\phi := 30^\circ$
---------------------------	---	-----------------------------	--------------------

Kantavuuden arvoja maaperän leikkautumiskulmalle: $N_c := 30.1^\circ$ $N_q := 18.^\circ$ $N_\gamma := 22.^\circ$

Foundation engineering, Braja M. Das, s. 138 taulukko 3.4

Epäkeskeisyyden laskenta:

Tuulikuorma paneeleihin:	$F_w := 1283\text{N}$	Tuulikuorma pystyrunkoon:	$F_{w2} := 770\text{N}$
--------------------------	-----------------------	---------------------------	-------------------------

Pystyrungon korkeus:	$L_{\text{runko}} := 6.5r$
----------------------	----------------------------

Tuulesta aiheutuva momentti:	$M := L_{\text{runko}} \cdot F_w + \frac{1}{2} \cdot L_{\text{runko}} \cdot F_{w2}$	$M = 85.956\text{kNm}$
------------------------------	---	------------------------

Betonin tiheys:	$\gamma_{\text{betoni}} := 22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
-----------------	---

Ylärungon paino:	$m_1 := 550\text{kg} \cdot g$	Pystyrungon paino:	$m_2 := 100\text{kg} \cdot g$
------------------	-------------------------------	--------------------	-------------------------------

Perustusten paino:	$m_3 := (L \cdot B \cdot h_1 + L_2 \cdot B_2 \cdot h_2) \cdot \gamma_{\text{betoni}}$
--------------------	---

Perustusten päällä olevan hiekan paino:	$m_4 := (L \cdot B - L_2 \cdot B_2) \cdot h_2 \cdot \gamma$
---	---

Perustusten pohjalle muodostuva paino:	$Q := m_1 + 1.15(m_2 + m_3 + m_4) = 124.331\text{kN}$
	1.15 on eurokoodin mukainen painotuskerroin

Epäkeskeisyysmitta:	$e := \frac{M}{Q} = 0.691\text{m}$
---------------------	------------------------------------

Suurin perustuksen alla muodostuva paine:	$q_{\text{max}} := \frac{4 \cdot Q}{3 \cdot L \cdot (B - 2e)} = 307.323\text{kPa}$
Foundation engineering s.150 kaava 3.47	

Tehokkaan pinta-alan ja muotokertoimien määrittäminen:

Foundation engineering s.152 kaavat 3.53 - 3.55

$$B_{\text{tehokas}} := B - 2 \cdot e = 0.317 \text{ m} \quad L_{\text{tehokas}} := L = 1.7 \text{ m}$$

$$A_{\text{tehokas}} := B_{\text{tehokas}} \cdot L_{\text{tehokas}} = 0.539 \text{ m}^2$$

Muotokertoimet tehokkaita mittoja käyttäen:

$$F_{\text{cs}} := 1 + \left(\frac{B_{\text{tehokas}}}{L_{\text{tehokas}}} \right) \cdot \left(\frac{N_q}{N_c} \right) = 1.114$$

Foundation engineering s.138 kaavat 3.25 - 3.27

$$F_{\gamma_s} := 1 - 0.4 \left(\frac{B_{\text{tehokas}}}{L_{\text{tehokas}}} \right) = 0.925$$

$$F_{\text{qs}} := 1 + \left(\frac{B_{\text{tehokas}}}{L_{\text{tehokas}}} \right) \cdot \tan(\phi) = 1.108$$

Syvyyskertoimen määrittäminen:

$$\text{Perustamissyvyys:} \quad D_f := h_1 + \frac{2}{3} \cdot h_2 = 1.35 \text{ m}$$

$$\frac{D_f}{B} = 0.794$$

koska perustamissyvyys on yhtä suuri tai pienempi kuin anturan leveys voidaan käyttää kaavoja 3.28-3.30 (Foundation engineering, s139)

$$F_{\text{cd}} := 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B} \right) = 1.318 \quad F_{\text{qd}} := 1 + 2 \cdot \tan(\phi) \cdot (1 - \sin(\phi))^2 \cdot \frac{D_f}{B} = 1.229 \quad F_{\gamma_d} := 1$$

Suurin kuormitus minkä perustus kestää:

$$\text{Maaperän kantokyky pinta-alaa kohden:} \quad q := \gamma \cdot D_f = 24.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Suurin katokyky perustuksen alla:} \quad q_u := q \cdot N_q \cdot F_{\text{qs}} \cdot F_{\text{qd}} + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B_{\text{tehokas}} \cdot N_{\gamma} \cdot F_{\gamma_s} \cdot F_{\gamma_d} = 668.039 \text{ kPa}$$

kaava 3.21

Koska perustuksessa on epäkeskeisyyttä suurin kuorma minkä perustus kestää on:

$$Q_{\text{ult}} := q_u \cdot A_{\text{tehokas}}$$

$$Q_{\text{ult}} = 360.35 \text{ kN}$$

$$n := \frac{Q_{\text{ult}}}{Q}$$

$$n = 2.898$$

Anturan koerkeus:

Jos epäkeskeisyydestä $e < L / 7 - a / 4$, lasketaan anturan korkeus kaavalla 151. (RIL 125 Teräsbetonirakenteet s.395)

$$e = 0.69 \text{ m} \quad \frac{L}{7} - \frac{L_2}{4} = 0.093 \text{ m}$$

$$\text{Jos } \frac{L}{7} - \frac{L_2}{4} < e < \frac{L}{3} + \frac{L_2}{4} \quad \text{käytetään kaavaa 157} \quad \frac{L}{3} + \frac{L_2}{4} = 0.717 \text{ m}$$

Suurin kuormitus anturaan:

$$p_d := q_{\max} = 307.323 \text{ kPa}$$

Anturan tason leveys keskiosasta reunaan:

$$c_X := \frac{L - L_2}{2} = 550 \text{ mm}$$

Betonin puristuslujuus: $f_{ctd} := 1.14 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$

$$\text{Anturan korkeus: } d := \frac{1}{1 + 0.3 \frac{f_{ctd}}{p_d}} \cdot c_X = 260.314 \text{ mm}$$

Anturan laskennalliseen korkeuteen lisätään raudoituksen paksuus ja raudoituksen peittävä betonikerros, joten valitaan anturan paksuudeksi 350mm

Raudoituksen laskenta:

Pilarianturan raudoitus määritellään taivutuksen perusteella, joten lasketaan suurin taivutusmomentti: RIL 125 Teräsbetonirakenteet, s. 152

$$M := \frac{1}{2} \cdot L \cdot p_d \cdot c_X^2 = 79.02 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Betonin ominaisuudet tavalliselle betonilaadulle K25:

$$\alpha_{cc} := 0.8 \quad f_{ck} := 20 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \quad \gamma_c := 1.4 \quad f_{cd} := \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = 11.333 \text{ MPa}$$

Betoniteäksen ominaisuudet A500HW laadulle:

Betoniteräksen myötölujuus: $f_{yk} := 500 \text{ MPa}$ Osavarmuuskerroin teräs: $\gamma_s := 1.1$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 4.348 \times 10^8 \text{ Pa}$$

laskentaleveys $b := L$ raudoituksen paksuuden veikkaus $h_{\text{raudoitus}} := 12 \text{ mm}$

tehollinen korkeus $d_a := h_1 - h_{\text{raudoitus}} - 50 \text{ mm}$

$$\text{Suhteellinen momentti: } \mu := \frac{M}{b \cdot d_a^2 \cdot f_{cd}} = 0.049$$

vaadittava raudoituksen määrä:

$$A_s := \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}\right) \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot d = 585.247 \text{ mm}^2$$

koska raudoituksen määrä jää pieneksi on hyvä tarkastella myös minimiraudoituksen ohjesääntö standardin En 1992-1-1 mukaan

$$f_{ctm} := \left(0.320^{\frac{2}{3}}\right) \text{ MPa} = 2.21 \text{ MPa}$$

$$A_{smin1} := 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d = 508.656 \text{ mm}^2$$

$$A_{smin2} := 0.0013 b \cdot d = 575.293 \text{ mm}^2$$

Raudoituksen minimimääräksi valikoituu:

$$A_s = 585.247 \text{ mm}^2$$

Valitun 12mm raudoituksen määrä:

$$A_{12\text{mm}} := \pi \cdot (6 \text{ mm})^2$$

$$\frac{A_s}{A_{12\text{mm}}} = 5.175$$

Lähtötiedot:

putkikoko:	323.9x6		
pituus:	$L := 6000\text{mm}$	seinämävahvuus:	$t := 6\text{mm}$
kimmokerroin:	$E := 209\text{GPa}$	halkaisija:	$d := 323.9\text{mm}$
myötöraja:	$f_y := 355\text{MPa}$	taivutusvastus:	$W := 467580\text{mm}^3$
kimmomoduuli:	$\nu := 0.3$	vääntövastus:	$W_t := 935160\text{mm}^3$
pinta-ala:	$A := 5992\text{mm}^2$	taivutusvastus:	$I := 75724700\text{mm}^4$

Kuormitukset:

Normaalkuorma:	$N_{ed} := 40\text{kN}$
Tuulesta tuleva momentti akselin suhteen	$M_{z,Ed} := 4\text{kNm}$
tuuulen vääntömomentti	$M_{y,Ed} := 83.454\text{kNm}$
Vääntökuorma:	$M_{t,Ed} := 1\text{kNm}$

Lommahduskestävyyden osavarmuusluku: Taulukko 2.5 s.49 $\gamma_{M1} := 1.1$

Kun myötöraja on 355MPa saadaan taulukko 2.8 s 56 $\varepsilon := 0.813$

tarkastetaan poikkileikkausluokka: taulukko 2.9 s. 57

$\frac{d}{t} = 53.983$ menee luokkien 2 ja 3 väliin, joten valitaan **poikkileikkausluokka 2**

putken kriittinen lommahdusjännitys ja muunnettu hoikkuus:

Eurocode EN 1993-1-6 määritelmän mukaan

$$C_x := 0.6$$

Putken seinämän keskilinjan säde: kaava 2.29 s.65

$$r_m := \frac{d}{2} - \frac{t}{2} = 158.95\text{mm}$$

pyöreän putken kimmainen kriittinen lommahdusjännitys:

kaava 2.32 s. 65

$$\sigma_{cr} := \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot C_x \cdot \frac{t}{r_m} = 2.865 \text{ GPa}$$

muunnettu hoikkuus:

kaava 2.31 s.65

$$\lambda_x := \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0.352$$

Putki täyttää valmistustoleranssiluokan B vaatimukset, kun ehdot

$$d \leq 500 \text{ mm} \quad \text{ja} \quad \frac{d}{t} \leq 100$$

Taulukko 2.12 s. 66

$$d \leq 500 \text{ mm} = 1 \quad \frac{d}{t} \leq 100 = 1$$

Valmistusluokan ollessa B saadaan valmistustarkkuuden laskentaparametriksi

$$Q := 2$$

Taulukko 2.11 s. 66

epätarkkuusamplitudin ominaisarvo:

kaava 2.28 s.65

$$\Delta w_k := \frac{\sqrt{r_m \cdot t}}{Q} = 1.235 \text{ mm}$$

kimmoisella alueella epätarkkuudesta aiheutuva pienennystekijä lommahdukselle:

s.65 kaava 2.27

$$\alpha_x := \frac{0.62}{1 + 1.91 \left(\frac{\Delta w_k}{t} \right)^{1.44}}$$

Muunnetun hoikkuuden plastinen raja-arvo:

kaava 2.30 s. 65

$$\lambda_{pl.x} := \sqrt{\frac{\alpha_x}{0.4}} = 1.138$$

kimmooplastinen pienennystekijä:

s.65 kaava 2.26b

kun $0,2 < \lambda_x < \lambda_{pl.x}$

$$\chi_x := 1 - 0.6 \frac{\lambda_x - 0.2}{\lambda_{pl.x} - 0.2}$$

Poikkileikkauksen puristuskestävyys:

s. 65 kaava 2.25

$$N_{c,Rd} := \frac{\chi_x \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 1.746 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Putken nurjahdustarkastelu:

"Epätarkkuustekijä α määräytyy sovellettavan nurjahduskäyrän perusteella. Eurocode 3:n mukaan kylmämuovatuilla rakenneputkilla käytetään kaikissa suunnissa kaikilla lujuusluokilla S235-S460 aina nurjahduskäyrää c, jolloin $\alpha = 0,49$ "

Epävarmuustekijä:	teksti s.70	$\alpha := 0,49$
Nurjahduspituus:	s.397 taulukko 7.6 s.70 kaava 2.40	$L_{cr} := 2 \cdot L = 12m$
Kimmoiteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma:		$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = 1.085 \times 10^3 \cdot kN$
Muunnettu hoikkuus:	s.70 kaava 2.38	$\lambda := \sqrt{\frac{\chi_x \cdot A \cdot f_y}{N_{cr}}} = 1.331$
Aputermi:	kaava 2.37 s. 70	$\Phi := 0.5 \left[1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2 \right]$
Pienennystekijä, kun $\lambda > 0,2$:	kaava 2.36b s.70	$\chi := \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = 0.376$
Nurjahduksenkestävyys:	kaava 2.42 s.71	$N_{b,Rd} := \chi \cdot N_{c,Rd} = 656.714 kN$
Mitoitusehto nurjahduksessa:	kaava 2.33 s.69	$N_{b,Rd} \geq N_{ed} = 1$ OK
Varmuuskerroin:		$n := \frac{N_{b,Rd}}{N_{ed}}$ $n = 16.418$

Lasketaan poikkeleikkauksen PL-luokan mukaiset puristuskestävyyden ja taivutuskestävyyden ominaisarvot. Poikkileikkausluokka oli alussa määritetty PL2.

taulukko 2.22 s.136

$$N_{Rk} := f_y \cdot A = 2.127 \times 10^6 N$$

$$M_{y,Rk} := f_y \cdot W = 1.66 \times 10^5 \cdot N \cdot m$$

$$M_{z,Rk} := M_{y,Rk} = 1.66 \times 10^5 \cdot N \cdot m$$

Määritellään momenttipinnan muodosta riippuvat kertoimet. Kuormamme on tasaisesti jakautunut ja momenttipinta suoraviivainen, joten:

$$\psi := 1 \quad \text{taulukko 2.25 s 139} \quad C_{my} := 0.6 + 0.4\psi = 1$$

$$C_{mz} := C_{my}$$

Koska rakenneputkemme on pyöreä se ei ole altis kiepahdukselle eli kiepahdus ei pienennä taivutuskestävyyttä. Kiepahduksen pienennystekijänä käytetään arvoa 1, jolloin voidaan käyttää taulukosta 2.23 saatavia yhteisvaikutustekijöitä, vaikka taulukko on tarkoitettu suorakaideprofiileille.

$$\text{teksti s.147} \quad \chi_{LT} := 1$$

$$\text{Kuormien yhteisvaikutustekijät: taulukko 2.23 s137} \quad k_{yy1} := C_{my} \left[1 + (0.2 - \lambda) \cdot \frac{N_{ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0.938$$

$$\text{saa olla kuitenkin enintään:} \quad k_{yy2} := C_{my} \left(1 + 0.8 \frac{N_{ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1.044$$

$$k_{yy} := k_{yy1}$$

$$k_{zz1} := C_{mz} \left[1 + (\lambda - 0.2) \cdot \frac{N_{ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 1.062$$

$$\text{saa olla kuitenkin enintään:} \quad k_{zz2} := C_{mz} \left(1 + 0.8 \frac{N_{ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1.044$$

$$k_{zz} := k_{zz2}$$

$$k_{yz} := 0.6k_{zz} \quad k_{zy} := 0.6k_{yy}$$

Tarkastetaan normaalivoimasta ja taivutusmomentin yhteisvaikutus:

$$\frac{N_{ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\left(\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} = 0.599$$

$$0.599 \leq 1.0 \quad \text{OK}$$

$$n_2 := \frac{1}{0.599} \quad n_2 = 1.669$$

lisäksi tarkastetaan ehto:

$$\frac{N_{ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\left(\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} = 0.394$$

$$0.394 \leq 1.0 \quad \text{OK}$$

$$n_3 := \frac{1}{0.394} \quad n_3 = 2.538$$

Väännön lisävaikutusta ei tarvitse huomioida, mikäli leikkausvoima on korkeintaan puolet väännön pienentämästä plastisesta leikkauskestävyydestä. Tällöin riittää pelkkä taivutusmomentin ja normaalivoiman tarkastelu.

Eli jos: $V_{Ed} \leq 0.5 V_{pl.T.Rd}$ niin vääntöä ei tarvitse huomioida. käsikirjan luku 2.9.1.7.1 s.127

Tuulikuormasta aiheutuva leikkausvoima:

$$V_{y.Ed} := 12.839 \text{ kN} \quad V_{z.Ed} := 0$$

Leikkausvoimien suurin arvo: kaava s.116

$$V_{Ed} := \sqrt{V_{y.Ed}^2 + V_{z.Ed}^2}$$

$$V_{Ed} = 1.284 \times 10^4 \text{ N}$$

Pyöreiden rakenneputkien leikkauspinta-ala
s.102 kaava 2.81

$$A_v := A \cdot \frac{2}{\pi}$$

EN 1993-1-1 määrittää kestävyysluokien osavarmuusluvut.
Paikallista ja vinoutumisnurjahdusta tarkastellessa
poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3 käytetään osavarmuuslukuna:
taulukko 2.5 s.49

$$\gamma_{M0} := 1$$

Pyöreiden rakenneputkien plastinen leikkauskestävyys:
s.101 kaava 2.81

$$V_{pl.Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}$$

Vapaan väännön osuus leikkajännityksestä:
s.113 kaava 2.99

$$\tau_{t.Ed} := \frac{M_{t.Ed}}{W_t}$$

Eurocode EN 1993-1-1 mukaan leikkausvoiman ja
vääntömomentin vaikuttaessa samanaikaisesti
leikkauskestävyys $V_{pl.Rd}$ pienennetään arvoon $V_{pl.T.Rd}$
kappale 2.9.1.2.1 s.113

$$V_{pl.T.Rd} := \sqrt{1 - \frac{\tau_{t.Ed}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right) \gamma_{M0}}} \cdot V_{pl.Rd}$$

$$V_{pl.T.Rd} = 779.801 \text{ kN}$$

Nähdään selkeästi, että alussa määritelty ehto täyttyy ja väännön lisävaikutusta ei tarvitse huomioida.

$$V_{Ed} = 12.839 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} \leq 0.5 V_{pl.T.Rd}$$

P4C liitoksen momentinsiirtokyky

Liitoksen mitat: $L := 70\text{mm}$ $d_2 := 58\text{mm}$ $e := 6\text{mm}$ $d_1 := 65\text{mm}$

Akselin laskennallinen halkaisija: $d_r := d_2 + e \cdot 2 = 70\text{mm}$

Sallitu pintapaine teräkselle: KOS. s378 taulukko 4.3-6 $p := 150\text{MPa}$

Akselin epäkeskeisyydestä: $e_r := \frac{d_1 - d_2}{4} = 1.75\text{mm}$

P4C momentinsiirtokyky: DIN 32712 $M_v := L \cdot \left(\pi \cdot d_r \cdot e_r + 0.05 d_r^2 \right) \cdot p$

$M_v = 6.613\text{kNm}$

Laakerin kuormituksen kesto

Laakeriin vaikuttava voima: $F := \frac{40\text{kN}}{2}$

Laakerin pituus ja halkaisija: $b := 60\text{mm}$ $d := 65\text{mm}$

Laakeriin vaikuttava pintapaine: valmistajan ilmoittama $p_{\text{ww}} := \frac{F}{b \cdot d} = 5.128\text{MPa}$

Taivutusmomentin kesto**Lasketaan ensin jännitys pääakselin keskivaiheilla:**

Taivutusmomentti 1: $M_1 := 4158\text{N}\cdot\text{m}$

akselin säde 1: $r := 44\text{mm}$

taivutusneliömomentti 1: $W_1 := \frac{\pi}{4} \cdot r^3$

taivutusjännitys 1: $\delta_1 := \frac{M_1}{W_1}$

$\delta_1 = 62.149\text{MPa}$

Lasketaan toiseksi jännitys pääakselin ja laipan liitoskohdassa:

Taivutusmomentti 2:	$M_2 := 1560 \text{ N}\cdot\text{m}$
akselin säde 2:	$r_2 := 32.5 \text{ mm}$
taivutusneliömomentti 2:	$W_2 := \frac{\pi}{4} \cdot r_2^3$
laakeripinnan säde:	$r_3 := 40 \text{ mm}$
nurkkapyöristys lovessa:	$r_4 := 2 \text{ mm}$
halkaisijoiden suhde:	$\frac{2r_3}{2r_2} = 1.231$
nurkkapyöristykseen suhde halkaisijaan:	$\frac{r_4}{2 \cdot r_2} = 0.031$
Kuvaajasta katsottu lovenmuotoluku:	$K_f := 2.2$
taivutusjännitys 2:	$\delta_2 := \frac{M_2}{W_2} = 57.861 \text{ MPa}$
Lovenvaikutusluku:	lujuusoppi s.374 kaava 1
	$K_f = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\text{nim}}}$
huippujännitys lovessa:	$\delta_{\max} := K_f \cdot \delta_2 = 131.923 \text{ MPa}$
Myötöraja:	$\delta_{\text{sall}} := 420 \text{ MPa}$
varmuusluku:	$n := \frac{\delta_{\text{sall}}}{\delta_{\max}}$
	$n = 3.184$

Ketjupyörän ja akselin välinen hitsiliitos

Saumaan vaikuttava voima:	$F_{\text{hitsi}} := 43.7 \text{ kN}$
Sauman pituus:	akselin kehän pituus
	$l_{\text{hitsi}} := 2 \cdot \pi \cdot 44 \text{ mm} = 276.46 \text{ mm}$
Hitsiaineen leikkauslujuus:	EN 1993-1-1 mukaan S420 teräkselle
	$f_{\text{wd}} := 231 \text{ MPa}$
Pienahitsin kestävyys:	KOS s.262 taulukko 3.3-3
	$a := \frac{F_{\text{hitsi}}}{f_{\text{wd}} \cdot l_{\text{hitsi}}} = 0.684 \text{ mm}$
ehto:	$8 \leq \frac{l}{a} \leq 100$
	ehdon mukainen minimi:
	$\frac{l_{\text{hitsi}}}{100} = 2.765 \text{ mm}$

Valitaan isompi a-mitta 4mm, mikä on ehtojen mukainen. Siinä tapauksessa sauman pituutta voidaan laskea n. 50mm, mutta käytetään sauman pituutta 100mm

Liite 4: Ylärunгон kuormitetuimman palkin tarkastelu

Lähtötiedot:

Putkikoko:	RHS 100x50x4	Taivutusmomentti (x):	$M_x := 2360 \text{ N}\cdot\text{m}$
Kimmokerroin:	$E := 210 \text{ GPa}$	Vääntömomentti:	$M_v := 1244 \text{ N}\cdot\text{m}$
Myötöraja:	$R_e := 355 \text{ MPa}$	Normaalivoima:	$N := 2950 \text{ N}$
Taivutusvastus:	$W_x := 134140 \text{ mm}^3$		
Vääntövastus:	$W_v := 31350 \text{ mm}^3$		
Pinta-ala:	$A := 1095 \text{ mm}^2$		

Jännitykset:

Taivutusjännitys:

$$\delta_x := \frac{M_x}{W_x} = 17.594 \text{ MPa}$$

Vääntöjännitys:

$$\tau_{xy} := \frac{M_v}{W_v} = 39.681 \text{ MPa}$$

Normaalivoima:

$$\delta_N := \frac{N}{A} = 2.694 \text{ MPa}$$

Käyttäen VVEH:n mukaista vakiovääristymisenergiyahypoteesia saadaan vertailujännityksen kaavaksi:
Lujuusoppi, Tapio Salmi, Sami Pajunen, s.336 kaava 6

HUOM! δ_x ja δ_N lasketaan yhteen koska ne ovat saman suuntaisia voimia. X-suuntaan

Vertailujännitys:

$$\delta_{VVEH} := \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[(\delta_x + \delta_N)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy})^2 \right]} = 70.211 \text{ MPa}$$

Varmuusluku:

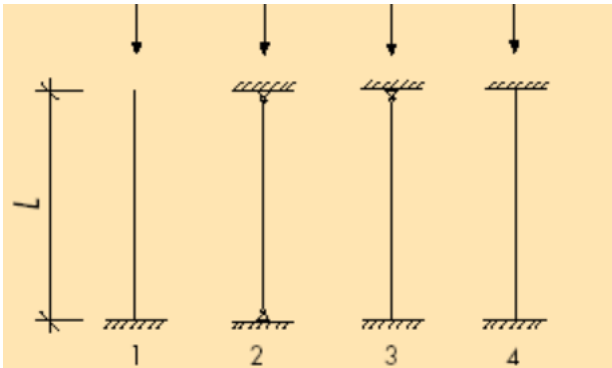
$$n := \frac{R_e}{\delta_{VVEH}} = 5.056$$

Liite 5: Paneelirunkojen väliputken 2 nurjahdustarkastelu

Lähtötiedot:

Putkikoko:	CHS 42,4x3		
Halkaisijat:	$r_{\text{sisä}} := 18.2\text{mm}$	$r_{\text{ulko}} := 21.2\text{mm}$	
Kimmomoduuli:	$E := 210\text{GPa}$		
Taivutusneliömomentti:	$I_{\text{lmoitettu}} := 72500\text{mm}^4$	Pinta-ala:	$A := 371\text{mm}^2$
Puristusvoima:	$N_{\text{max}} := -46120\text{N}$	Pituus:	$L := 660\text{mm}$

Tapaustamme kuvaa parhaiten Eulerin nurjahdustapaus 3, vaikka sekään ei täydellisesti kuvaa tilannettamme.



Eulerin nurjahduspituus:

$$L_n := 0.699L = 0.461\text{m}$$

Laskettu taivutusneliömomentti:

$$I := \frac{\pi}{4} \cdot (r_{\text{ulko}}^4 - r_{\text{sisä}}^4) = 7.247 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4$$

Alin nurjahdusvoima:

$$P_n := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_n^2} = 705.76\text{kN}$$

Varmuus nurjahduksen suhteen:

$$n := \frac{P_n}{|N_{\text{max}}|} = 15.303$$

Vertailujännitys lasketaan samalla tavalla kuin liitteessä 4 on esitetty ja saadaan tulos:

$$\sigma_{\text{VEH}} := 91.6\text{MPa}$$

$$n_{\text{VEH}} := 3.87$$

Liite 6: Laakeripesän käsinlasku

pinta-ala: $A_1 := 10\text{mm} \cdot 96\text{mm}$ $A_2 := 10\text{mm} \cdot 44\text{mm}$ $A := A_1 + A_2$

normaalijännitys: $N := 20\text{kN}$ $\delta_N := \frac{N}{A} = 14.286\text{MPa}$

valitaan pinnan alapinta pintakeskiöiden nollataoksi

tasopintojen pintakeskiöiden sijainnit: $y_{01} := 5\text{mm}$ $y_{02} := 10\text{mm} + \frac{44\text{mm}}{2} = 32\text{mm}$

koko pinnan pintakeskiön sijainti: $y_0 := \frac{A_1 \cdot y_{01} + A_2 \cdot y_{02}}{A} = 13.486\text{mm}$

taivutusneliömomentti:

$$I_x := \frac{96\text{mm}(54\text{mm})^3}{12} + \left(\frac{54\text{mm}}{2} - y_0\right)^2 \cdot A - 2 \cdot \frac{43\text{mm}(44\text{mm})^3}{12} - (32\text{mm} - y_0)^2 \cdot 43\text{mm} \cdot 44\text{mm}$$

taivutusvastus yläpinnalle:

$$I_x = 2.564 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$W_1 := \frac{I_x}{54\text{mm} - y_0} = 6.328 \times 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

taivutusvastus alapinnalle:

$$W_2 := \frac{I_x}{y_0} = 1.901 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$$

Laakerikuorman etäisyys nollatasosta:

$$L := \frac{49\text{mm}}{2} - 5\text{mm} = 19.5\text{mm}$$

Laakerikuorman epäkeskeisyys:

$$L_{\text{momentti}} := L - y_0 = 6.014\text{mm}$$

Epäkeskeisyydestä aiheutuva momentti:

$$M_x := N \cdot L_{\text{momentti}} = 120.286\text{N} \cdot \text{m}$$

Taivutusjännitys ylä- ja alapinnalla:

$$\delta_{t1} := \frac{M_x}{W_1} = 19.008\text{MPa}$$

$$\delta_{t2} := \frac{-M_x}{W_2} = -6.327\text{MPa}$$

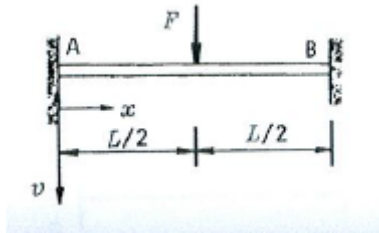
Yhtenlaskettu jännitys ylä- ja alapinnalla:

$$\delta_1 := \delta_N + \delta_{t1} = 33.294\text{MPa}$$

$$\delta_2 := \delta_N + \delta_{t2} = 7.959\text{MPa}$$

Liite 7: Kelkan välipalkin käsinlasku

Suurimman poikittaisen kuorman alla olevan tuen tilanne on lähes kuvassa esitetyn kaltainen:



Kuormittava voima:

$$F_1 := \frac{4450\text{N}}{4}$$

Poikittaistuen pituus:

$$L_1 := 1080\text{mm}$$

Putkiprofiili:

RHS 40x20x2

Taivutusvastus:

$$W_1 := 2020\text{mm}^3$$

Taivutusneliömomentti:

$$I_1 := 40500\text{mm}^4$$

Kimmokerroin:

$$E := 210\text{GPa}$$

Suurin tuilla vaikuttava momentti:

$$M_{\max 1} := \frac{1}{8} \cdot F_1 \cdot L_1$$

$$M_{\max 1} = 150.188\text{N}\cdot\text{m}$$

Lujuusoppi, Tapio salmi, Sami Pajunen s.448

$$\delta_1 := \frac{M_{\max 1}}{W_1}$$

$$\delta_1 = 74.35\text{MPa}$$

$$v_{\max 1} := \frac{F_1 \cdot L_1^3}{192 \cdot E \cdot I_1}$$

$$v_{\max 1} = 0.858\text{mm}$$

Samalla tavalla voidaan ajatella pituussuuntaisten palkkien olevan rasitettu keskimäärin:

Kuormittava voima:

$$F_2 := \frac{F_1}{2} = 556.25\text{N}$$

Poikittaistuen pituus:

$$L_2 := 535\text{mm}$$

Putkiprofiili:

U-profiili 40x40x2

$$b_1 := 2\text{mm}$$

$$h_1 := 36\text{mm}$$

$$b_2 := 40\text{mm}$$

$$h_2 := 2\text{mm}$$

$$h_3 := 20\text{mm}$$

Taivutusneliömomentti:

$$I_2 := \frac{1}{12} \cdot 40\text{mm} \cdot (40\text{mm})^3 - \frac{1}{12} \cdot 38\text{mm} \cdot (36\text{mm})^3 = 6.559 \times 10^4 \cdot \text{mm}^4$$

Taivutusvastus:

$$W_2 := \frac{I_2}{h_3} = 3.279 \times 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

Suurin päissä vaikuttava momentti:

$$M_{\max 2} := \frac{1}{8} \cdot F_2 \cdot L_2$$

$$M_{\max 2} = 37.199\text{N}\cdot\text{m}$$

Suurin taivutusjännityksen arvo:

$$\delta_2 := \frac{M_{\max 2}}{W_2}$$

$$\delta_2 = 11.343\text{MPa}$$

Ilmansuunnan käännön yläakseli

Lähtötiedot: $\delta_{sall} := \frac{355}{2} \text{MPa}$ $\nu := 0.3$ $E := 210 \text{GPa}$ $G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$ $L := 2.13 \text{m}$

Mitoitetaan ketjun murtolujuuden mukaan:

$$F := 60000 \text{N}$$

yläpään hammaspyörän säde:

$$r_1 := 42.8 \text{mm}$$

yläakseliin muodostuva momentti:

$$T_1 := F \cdot r_1 = 2.568 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Laskennallisesti tarvittu vääntövastus: $\delta_{sall} = \frac{T}{W_{\min}}$ $W_{\min} := \frac{T_1}{\delta_{sall}} = 1.447 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$

Ruukin rakenneputkien poikkileikkaustaulukosta tarvitaan minimissä: 60,3x4 rakenneputki

Valitaan kuitenkin jo rakenteessa käytetty CHS 60,3x4 $D := 60 \text{mm}$ $d := 52 \text{mm}$ $\beta := \frac{d}{D}$

Lasketaan itse putken vääntövastus: $W_{\text{lask}} := \frac{\pi \cdot D^3}{16} \cdot (1 - \beta^4) = 1.848 \times 10^4 \cdot \text{mm}^3$

Ilmoitettu vääntövastus ja vääntöneliömomentti: $I_v := 563500 \text{mm}^4$ $W_v := 18690 \text{mm}^3$

Vääntöjännitys:

$$\delta_{v1} := \frac{T_1}{W_v} = 137.4 \text{MPa}$$

tarkistetaan kiertymä

$$\phi_1 := \frac{T_1 \cdot L}{I_v \cdot G} = 6.886 \text{deg}$$

Ilmansuunan käännön alaakseli

välivaihteen välityssuhde: $r_2 := 60.8 \text{ mm}$ $r_3 := 28.17 \text{ mm}$ $i := \frac{r_2}{r_3} = 2.159$

toisella akselilla vaikuttava vääntömomentti: $T_2 := \frac{T_1}{i} = 1.19 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

pienin sallittu vääntövastus: $W_{\min 2} := \frac{T_2}{\delta_{\text{sall}}} = 6.702 \times 10^3 \cdot \text{mm}^3$

valitaan putkeksi ruukin taulukon arvoista katsomalla CHS 42,4x3. Putki on samaa kuin käytetään paneelirunkojen putkissa, mikä on kustannustehokkuudeltaankin paras vaihtoehto.

Ilmoitettu vääntövastus ja vääntöneliömomentti: $I_{v2} := 144900 \text{ mm}^4$ $W_{v2} := 6840 \text{ mm}^3$

Vääntöjännitys:

$$\delta_{v2} := \frac{T_2}{W_{v2}} = 173.92 \text{ MPa}$$

tarkistetaan kiertymä

$$\phi_2 := \frac{T_2 \cdot L}{I_{v2} \cdot G} = 12.405 \text{ deg}$$

Akselin ruuviliitosten kesto ja kiristysmomentti:

Akselin liitospintojen kitkakerroin suunnilleen: $\mu := 0.2$

Koneen osien suunnittelu taulukko 3.2.5-1

Kiristysruuvien tiedot: Koko = M12 8.8 lujuusluokalle $R_{p0.2} := 640 \text{ MPa}$

<http://www.ruuvihankinta.fi/images/pdf/HRH010Nousut.pdf> $d_{\min} := 9.543 \text{ mm}$

$P := 1.75 \text{ mm}$ $d_2 := 10.7 \text{ mm}$

Pienin sisähalkaisija M12 ruuville: $A_{\min} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{\min}^2 = 71.525 \text{ mm}^2$

Venymärajaa vastaava normaalivoima: $F_{p0.2} := R_{p0.2} \cdot A_{\min} = 45.776 \text{ kN}$

Tarvittava ruuvivoima, ettei luistamista tapahdu: $F_{\min} := \frac{T_1 \cdot 2}{D} = 85.6 \text{ kN}$

Ruuvi ottaa 2 kohtaa kiinni akseliin jolloin tarvittava esikiristysvoima on vain neljäsosa: $\frac{F_{\min}}{2} = 42.8 \text{ kN}$

Valitaan esikiristysvoima $0.2 F_{p0.2} \leq F_v \leq 0.9 F_{p0.2}$ $F_v := 0.9 F_{p0.2} = 41.199 \text{ kN}$

Esikiristysvoima liian lähellä venymärajaa, joten on käytännöllisempää valita vahvempi ruuvi vähjntään lujuusluokasta 10.9

$R_{p0.2.2} := 900 \text{ MPa}$ $F_{p0.2.2} := A_{\min} \cdot R_{p0.2.2}$ $F_{v2} := 0.7 F_{p0.2.2} = 45.061 \text{ kN}$

KOS s.231 taulukko 3.2.6-1 $\mu_G := 0.1$

KOS s.226 kaava 3.2.6-1

Ruuvivoimaa vastaava kiristysmomentti: $M_G := \frac{1}{2} \cdot d_2 \cdot F_{v2} \cdot \left(1.155 \mu_G + \frac{P}{\pi \cdot d_2} \right)$ $M_G = 45.964 \text{ N} \cdot \text{m}$

Keskimääräinen kitkan vaikutusalan halkaisija: $D_{km} := 15 \text{ mm}$ $\mu_K := 0.1$

Ruuvien kannan ja/tai ruuvien kannan välinen kitkamomentti:

KOS s.230 3.2.6-9 $M_k := \frac{1}{2} \cdot \mu_K \cdot D_{km} \cdot F_{v2}$ $M_k = 50.694 \text{ N} \cdot \text{m}$

Yhteenlaskettu kiristysmomentti ruuville: $M_A := M_G + M_k$ $M_A = 96.657 \text{ N} \cdot \text{m}$

KOS s.231 kaava 3.2.6-10

Liite 9: Ilmansuunnan kääntömekanismin akselivälit

Ilmansuunnan kääntömekanismin akseliväli ylös

Ylhäällä ketjuparina on B12 kokoinen ketjupyörinä 45 ja 13 hampainen levyketjupyörä

$$p := 19.05\text{mm} \quad z_1 := 45 \quad z_2 := 13 \quad i_1 := \frac{z_1}{z_2} = 3.462$$

Kaavat kappaleesta 6.2 Ketjuvälitykset s.569 (Koneenosien suunnittelu, WSOY)

$$\text{lenkkilukukerroin: } 6.2-8 \quad k_x := \left(\frac{z_2 - z_1}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad \text{tavoiteltu akseliväli: } a_0 := 245\text{mm}$$

$$\text{lenkkien alustava lukumäärä: } 6.2-10 \quad X_0 := 2 \cdot \frac{a_0}{p} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \frac{k_x \cdot p}{a_0} = 56.739$$

$$\text{valitaan alustavasta lenkkien lukumäärästä lähin parillinen kokonaisluku} \quad X := 56$$

$$\text{etäisyyskerroin: } 6.2-11 \quad k_1 := X - \frac{z_1 + z_2}{2}$$

$$\text{tarkka akseliväli: } 6.2-12 \quad a := \frac{p}{4} \left(k_1 + \sqrt{k_1^2 - 8 \cdot k_x} \right) \quad a = 237.345\text{mm}$$

Ilmansuunnan kääntömekanismin akseliväli keskivaihteelle

$$p_2 := 15.875\text{mm} \quad z_4 := 11 \quad z_3 := 24 \quad i_2 := \frac{z_3}{z_4} = 2.182$$

$$k_{x2} := \left(\frac{z_4 - z_3}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad a_{02} := 126\text{mm} \quad X_{02} := 2 \cdot \frac{a_{02}}{p_2} + \frac{z_3 + z_4}{2} + \frac{k_{x2} p_2}{a_{02}} = 33.913$$

$$X_2 := 34 \quad k_2 := X_2 - \frac{z_3 + z_4}{2} \quad a_2 := \frac{p_2}{4} \left(k_2 + \sqrt{k_2^2 - 8 \cdot k_{x2}} \right) \quad a_2 = 126.712\text{mm}$$

Kokonaisvälytysuhde voimansiirrolle

$$i_{\text{kok}} := i_1 \cdot i_2 \quad i_{\text{kok}} = 7.552$$

Liite 10: Ilmansuunnan käännön lukitustapit

Reikien säde momenttikeskiöstä:

$$r := 185\text{mm}$$

Kuormitus momentti:

$$T_{\max} := 7500\text{N}\cdot\text{m}$$

Tapin tiedot:

$$r_{\text{tappi}} := 6\text{mm} \quad A := \pi \cdot r_{\text{tappi}}^2$$

$$d_1 := 2 \cdot r_{\text{tappi}} \quad L_1 := 5\text{mm}$$

Tapin taivutusneliömomentti:

$$I_1 := \frac{\pi \cdot d_1^4}{64} = 1.018 \times 10^3 \cdot \text{mm}^4$$

Tapin taivutusvastus:

$$W_1 := \frac{I_1}{r_{\text{tappi}}}$$

Yhteen tappiin vaikuttava voima (yht 4 tappia)

$$F_{\text{tappi}} := \frac{T_{\max}}{4r} = 10.135\text{kN}$$

Suurin leikkausjännitys tapin reunoilla:

$$\delta_Q := 1.5 \frac{F_{\text{tappi}}}{A} \quad \delta_Q = 134.421\text{MPa}$$

Tappiin vaikuttava taivutusmomentti:

$$M := L_1 \cdot F_{\text{tappi}} = 50.676\text{N}\cdot\text{m}$$

Taivutusjännitys:

$$\delta_{\text{taivutus}} := \frac{M}{W_1} \quad \delta_{\text{taivutus}} = 298.714\text{MPa}$$

Liite 11: Ilmansuunnan lukituslevyn tukipalkit

Valittu putkiprofiili:

RHS 50x30x3

Tuen kulman kuormitustasoon nähden:

$\alpha := 25\text{deg}$

Tukien yläpään etäisyys momenttikeskistä:

$L_1 := 50\text{mm}$

Tukien alapään etäisyys momenttikeskistä:

$L_2 := 135\text{mm}$

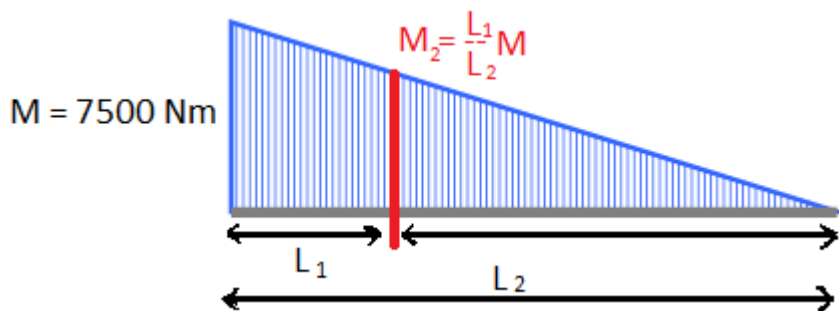
Profiilin poikkileikkaustiedot:

$$I_x := 128300\text{mm}^4 \quad I_y := 135300\text{mm}^4$$

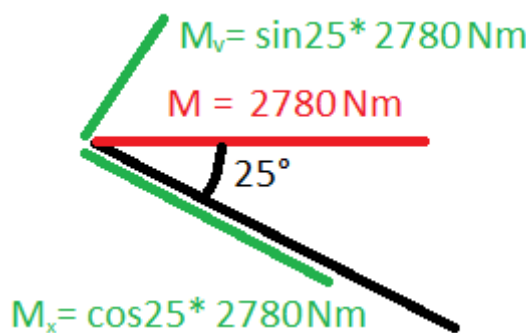
$$W_x := 5130\text{mm}^3 \quad W_y := 6490\text{mm}^3$$

Tuennan yläpäässä vaikuttava momentti:

$$M := 750\text{N}\cdot\text{m} \cdot \frac{L_1}{L_2} = 2.778 \times 10^3 \cdot \text{N}\cdot\text{m}$$



Jaetaan momentti tuennan suuntaisiin komponentteihin: tukipalkkeja on 4



$$M_v := \frac{\sin(\alpha) \cdot M}{4} = 293.485\text{N}\cdot\text{m}$$

$$M_x := \frac{\cos(\alpha) \cdot M}{4} = 629.38\text{N}\cdot\text{m}$$

Taivutusjännitys tuessa:

$$\delta_x := \frac{M_x}{W_x} = 122.686\text{MPa}$$

Vääntöjännitys tuessa:

$$\tau_{\max} := \frac{M_v}{W_v} = 45.221\text{MPa}$$

VonMises vertailujännitys:

$$\delta_{VVEH} := \sqrt{\delta_x^2 + 6 \cdot (\tau_{\max}^2)}$$

$$\delta_{VVEH} = 165.292\text{MPa}$$

Liite 12: Paneelikulman akseleiden kiilaliitokset

ketjupyörän ja akselin välinen kiilaliitos:

akselin hankaisija:	$d := 25\text{mm}$	navan kiilauran halkaisija:	$t := 28.3\text{mm}$
kiilan pituus:	$l := 30\text{mm}$	kiilan leveys:	$b := 8\text{mm}$
kiilan korkeus:	$h := 8\text{mm}$	akselin ura:	$t_1 := 5\text{mm}$
navan ura:	$t_2 := t - d = 3.3\text{mm}$	sallittu pintapaine:	$p_{\text{sall}} := 150\text{MPa}$

Navan momentinsiirtokyky: $M_{\text{vn}} := p_{\text{sall}} \cdot l \cdot t_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (d + t_2) = 210.128\text{N}\cdot\text{m}$ $M_{\text{vn}} = 210.1\text{N}\cdot\text{m}$

KOS kaava 4.3-18 s.383

Akselin momentinsiirtokyky: $M_{\text{va}} := p_{\text{sall}} \cdot l \cdot t_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot (d + t_1) = 337.5\text{N}\cdot\text{m}$

Arvioitu kulmakihtyvyys paneeleille: $\alpha := 0.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$

Hitausmomentti ylärungolle: $J := 358.6\text{kg}\cdot\text{m}^2$ $T := J \cdot \alpha = 179.3\text{N}\cdot\text{m}$

Napoja on 2 ja jo yksi tasakiila pystyy siirtämään yli tavoitellun momentin, joten

valitaan tasakiila: DIN 6885A St 8x8x30 Tasakiila

Vaihteen suositeltu maksimimomentti: $T_{\text{vaihde}} := 135\text{N}\cdot\text{m}$

Välityssuhde rullaketjussa pääakselin ja vaihteen välillä: $i := 2.61$

Vaihteen kesto pääakselilta muodostuville momenteille: $T_{\text{vaihde}} \cdot i = 353.025\text{N}\cdot\text{m}$

Väliakselin tasakiilan momentinsiirtokyky:

$$t_m := 21.8 \text{ mm}$$

$$b_m := 6 \text{ mm}$$

$$d_m := 19 \text{ mm}$$

$$h_m := 6$$

$$l_m := 30 \text{ mm}$$

uran syvyys navassa:

$$t_{2m} := t_m - d_m = 2.8 \text{ mm}$$

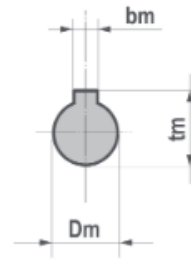
uran syvyys akselilla:

$$t_{1m} := 3 \text{ mm}$$

$$M_{vnm} := p_{sall} \cdot l \cdot t_{2m} \cdot \frac{1}{2} \cdot (d_m + t_{2m}) = 137.34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{vnm} = 137.34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{vam} := p_{sall} \cdot l \cdot t_{1m} \cdot \frac{1}{2} \cdot (d_m + t_{1m}) = 148.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Momentinsiirtokyky vaihteen yli on moninkertainen ensiöakselin suurimman sallitun kuormitukseen nähden, joten kiila kestää varmasti ja valitaan kiilaksi: DIN 6885A St 6x6x30 Tasakiila

Liite 13: Paneelien kulman lukitustappi

Lukitusreikien säde momenttikeskiöstä: $r := \frac{390}{2} \text{ mm}$

Kimmomerroin, myötöraja, lukitustapin säde, lumikuorma, tapin pinta-ala:

$$E := 210 \text{ GPa} \quad r_{\text{tappi}} := 9 \text{ mm} \quad \delta_{\text{sall}} := 355 \text{ MPa} \quad F_{\text{lumi}} := 35.57 \text{ kN} \quad A := \pi \cdot r_{\text{tappi}}^2$$

Arvioitu suurin lumikuorman aiheuttama momentti: $T_{\text{lumi}} := \frac{F_{\text{lumi}}}{4} \cdot \frac{1700 \text{ mm}}{2} = 7.56 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Tappiin momentista aiheutuva voima: $F_{\text{tappi}} := \frac{T_{\text{lumi}}}{r} = 38.77 \text{ kN}$

Leikkausjännitys: $\delta_Q := 1.5 \frac{F_{\text{tappi}}}{A} \quad \delta_Q = 228.534 \text{ MPa}$

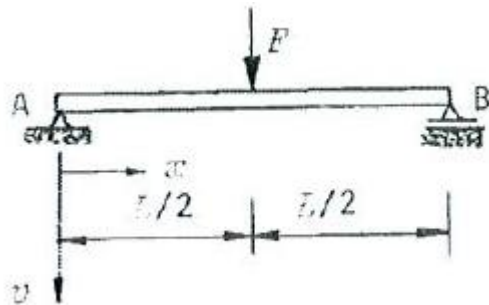
Taivutusjännitys yhdellä tuella: $L_1 := 5 \text{ mm} \quad d_1 := 2 \cdot r_{\text{tappi}} \quad I_1 := \frac{\pi \cdot d_1^4}{64} = 5.153 \times 10^3 \cdot \text{mm}^4$

$$M := L_1 \cdot F_{\text{tappi}} = 193.849 \text{ N}\cdot\text{m} \quad W_1 := \frac{I_1}{d_1} \quad \delta_{\text{taivutus}} := \frac{M}{W_1} \quad \delta_{\text{taivutus}} = 677.137 \text{ MPa}$$

Tuentaa ei voida siis suunnitella missään tapauksessa yhden tuennan varaan!

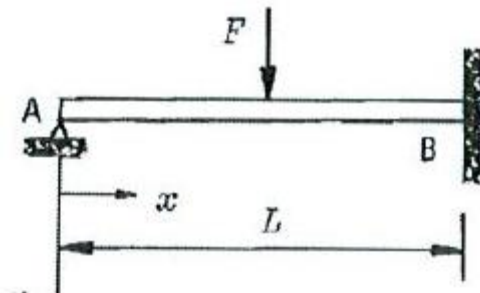
Taivutusjännitys kahdella tuella: $L_2 := 16 \text{ mm}$

oletetaan todellisen tuennan vastaavan kuvissa esitettyjen kuvien tilanteita, joissa suurimmat taivutusmomentit ovat:



$$M_1 := \frac{3}{16} \cdot F_{\text{tappi}} \cdot L_2 = 116.309 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_2 := \frac{1}{4} \cdot F_{\text{tappi}} \cdot L_2 = 155.079 \text{ N}\cdot\text{m}$$



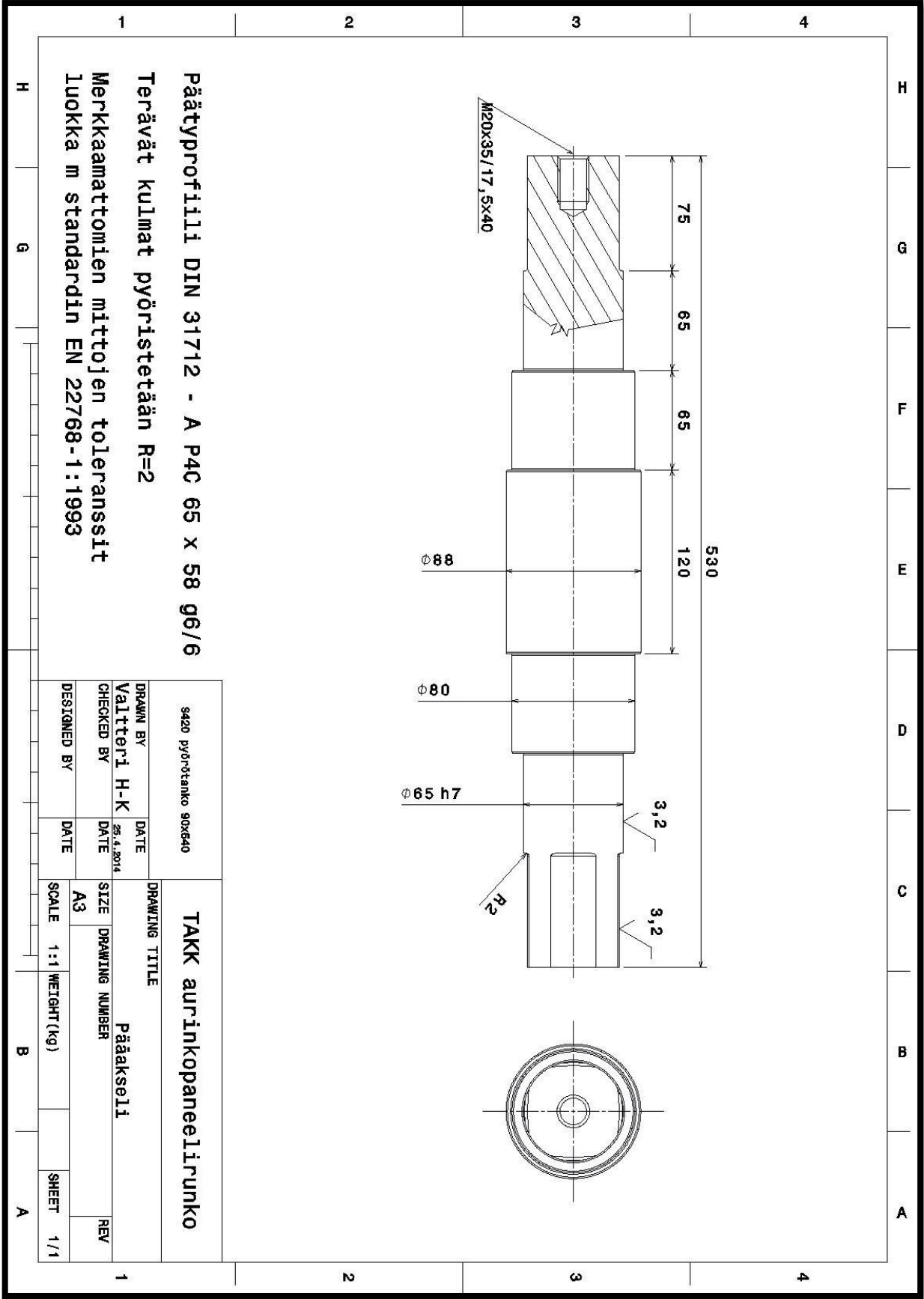
$$\delta_{\text{taivutus2}} := \frac{M_1}{W_1} \quad \delta_{\text{taivutus2}} = 406.282 \text{ MPa}$$

$$\delta_{\text{taivutus3}} := \frac{M_2}{W_1} \quad \delta_{\text{taivutus3}} = 541.709 \text{ MPa}$$

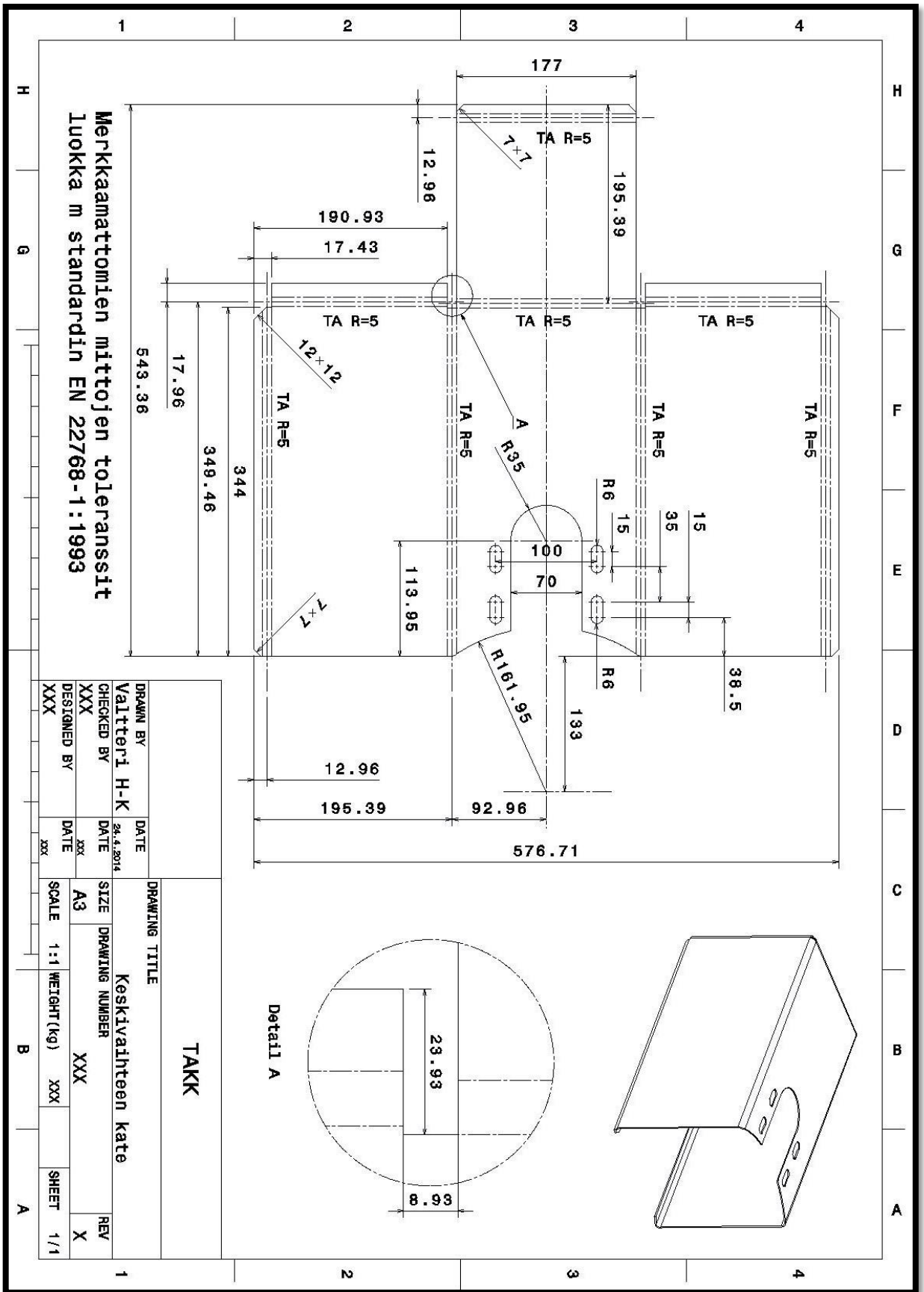
$$\delta_{\text{taivutus1}} := \frac{\delta_{\text{taivutus2}} + \delta_{\text{taivutus3}}}{2}$$

Taivutusjännitys arvio: $\delta_{\text{taivutus1}} = 473.996 \text{ MPa}$

Liite 14: Paneelirunkojen välisen pääakselin työpiirustus

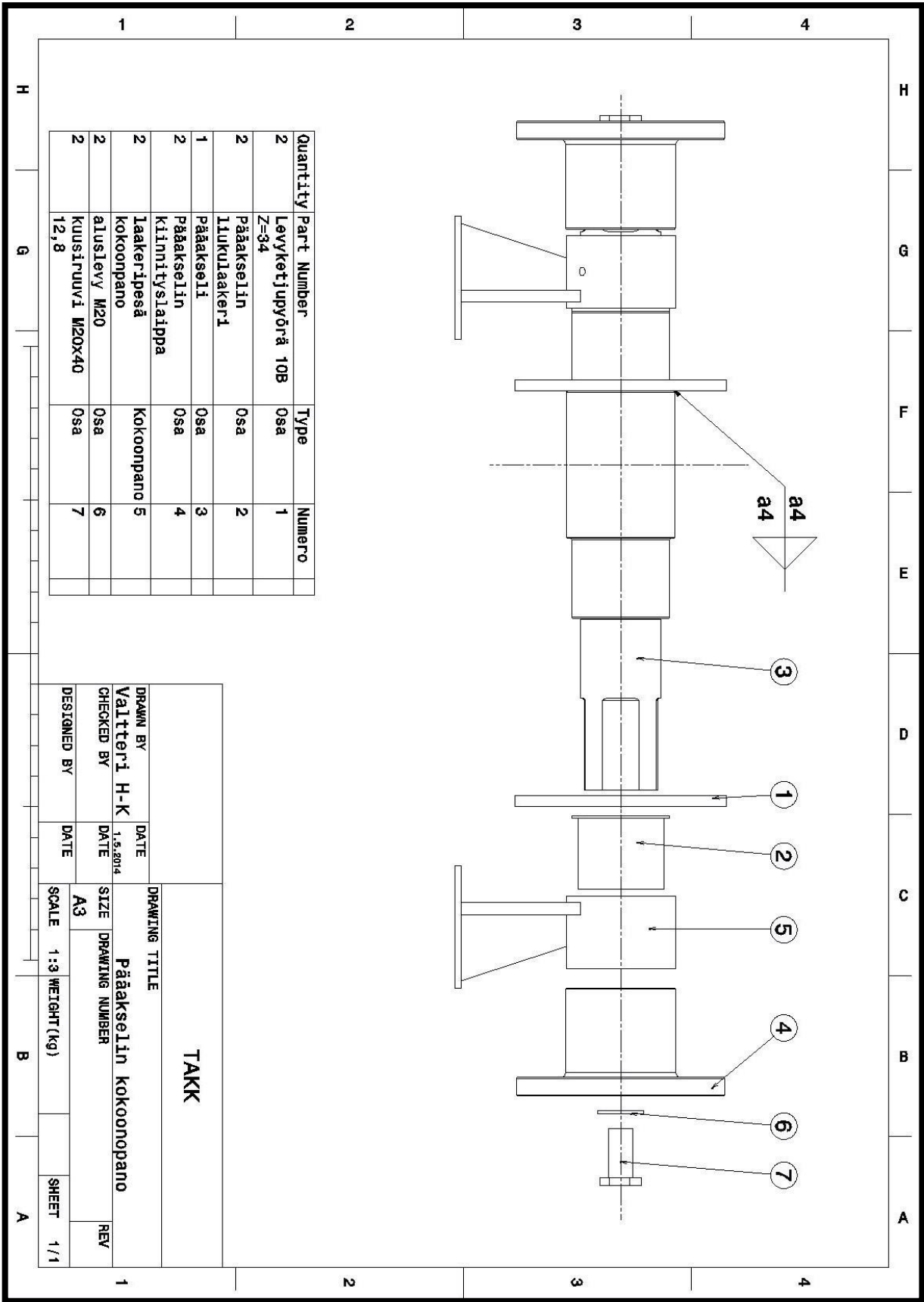


Liite 15: Keskivaihteen katteen työpiirustus



Määrä	Osan nimi	Type	Numero
1	Sivutuen putki 1	CATPart	1
1	Sivutuen putki 2	CATPart	2
1	Sivutuen putki 3	CATPart	3
1	Sivutuen palkki	CATPart	4
3	Kelkan yläkiinnike	CATPart	5
1	Kelkan kannatin	CATPart	6
1	Kelkan kiinnityslevy	CATPart	7

Liite 17: Paneelirunkojen välisen pääakselin kokoonpanon työpiirustus



Liite 18: Ylätasanteen akselin työpiirustus

